ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

L. PASTOURIAUX
M. BELLIER
A. VAROQUAUX
A. GALICHON

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

MESURES ET ESSAIS ÉLECTRIQUES

LYCÉES TECHNIQUES
TECHNICIENS

LIBRAIRIE DELAGRAVE

A LA MÊME LIBRAIRIE

L. PASTOURIAUX, A. VAROQUAUX, M. BELLIER, A. GALICHON

ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

I. Lois générales
II. Machines électriques
III. Électronique

L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX ,

ÉLECTRICITÉ PRATIQUE

LEÇONS D'ÉLECTRICITÉ. Deux fascicules.

A. VAROQUAUX et R. FRAYSSE

TECHNOLOGIE DES MONTEURS-ÉLECTRICIENS

AIDE-MÉMOIRE TECHNOR

Collection dirigée par A. CHEVALLIER

P. HEINY

ÉLECTRICITÉ APPLIQUÉE

M. BIBAL et P. HEINY

ÉLECTRONIQUE APPLIQUÉE

AIDE-MÉMOIRE TECHNOR-PILOTE DU C. A. P.

sous la direction de A. CHEVALIER

P. HEINY

C. A. P. MONTEUR-ÉLECTRICIEN (premier livre, réf. 121)

PLAQUETTE TECHNOR

GRANDEURS ET SYMBOLES ÉLECTRIQUES

124e Mille

ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX

Inspecteur Général honoraire de l'Enseignement technique

Directeur honoraire de l'École nationale professionnelle de Nancy.

MESURES ET ESSAIS ÉLECTRIQUES

à l'usage des
Lycées techniques industriels et des Techniciens de l'Industrie

NOUVELLE ÉDITION MISE A JOUR

par

M. BELLIER et A. GALICHON

Agrégé des Sciences physiques
Professeur d'électricité
au Conservatoire national
des Arts et Métiers.

Directeur du centre
d'Aix-en-Provence
de l'E. N. S. d'Arts et Métiers.

PARIS
LIBRAIRIE DELAGRAVE
1968

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays, y compris l'U. R. S. S.

© *Librairie Delagrave*, 1946.

Quelques conseils aux élèves sur la conduite des manipulations.

I. — Avant la séance de mesures ou d'essais.

1. Étudiez ce que vous aurez à faire. C'est pour vous aider dans ce travail que ce livre a été écrit. Reportez-vous à votre cours d'électricité, s'il y a lieu, pour bien comprendre votre tâche. *Une manipulation doit être faite mentalement avant d'être exécutée matériellement.*

2. Préparez votre cahier de manipulations : dessinez les schémas des montages à réaliser et *tracez les tableaux où seront notés les résultats des mesures.*

Pas de notes, pas de calculs sur des bouts de papier ou des feuilles volantes. *Ordre et soin sont les qualités maîtresses d'un expérimentateur.*

II. — Au laboratoire ou à la salle d'essais.

1. Examinez avec attention, avant de les employer, les appareils qui vous sont confiés. Avant de s'en servir, il faut connaître leur principe, leur fonctionnement et leur maniement. Au besoin, consultez les manuels qui les décrivent. Ce n'est que si les documents vous manquent que vous recourrez à votre professeur.

Signalez immédiatement au maître les instruments qui vous paraissent détériorés ou en mauvais état.

2. Effectuez le montage de la manipulation avec *soin* et, si possible, avec *élégance.*

Montez chaque instrument complètement avant d'en ajouter un autre à l'ensemble.

Disposez les conducteurs pour qu'ils se croisent le moins possible. Choisissez leur section et leur isolement en tenant compte de l'intensité qui les parcourt et de la tension qui leur est appliquée. Il est ridicule de brancher un voltmètre avec un câble de plusieurs milimètres carrés de section. Il est dangereux d'employer des fils de sonnerie quand la tension est de l'ordre d'une centaine de volts.

3. En vous aidant du schéma, vérifiez votre montage quand il est terminé. *Ne le mettez sous tension qu'après contrôle par le professeur.*

Ne démontez les appareils qu'après vous être assuré que vous n'en avez plus besoin.

4. Faites les expériences sans hâte et avec réflexion.

Effectuez chaque mesure avec toute la précision possible. Appréciez

dans toute lecture le cinquième ou le dixième de la plus petite des divisions de la graduation.

Evitez les grosses fautes : déterminez exactement les chiffres des dizaines et des unités avant de porter votre attention sur le chiffre des dixièmes.

5. *Inscrivez immédiatement toutes les mesures à leur place sur le tableau des résultats exactement comme vous les avez lues sur les échelles*, sans entreprendre de conversion, ni tenter de correction. Notez à part les renseignements nécessaires aux conversions et aux corrections : par exemple, les numéros identifiant les appareils, le calibre des shunts, la portée de mesure des voltmètres.

Que vous vous serviez de crayon ou d'encre, peu importe, mais habituez-vous à écrire les nombres lisiblement et nettement. Réussissez du premier coup un tableau de nombres qui soit clair, bien présenté, définitif. Votre cahier de manipulations doit pouvoir être lu aussi facilement par un autre que par vous.

6. *Ne faites, au cours des expériences, aucun travail que vous puissiez tout aussi bien exécuter après.* Ainsi n'effectuez de calculs que si leurs résultats sont indispensables pour continuer la manipulation.

7. *Effectuez tous les calculs proprement et avec ordre sur votre cahier d'expériences même*, pour pouvoir les vérifier par la suite.

Il suffit presque toujours d'employer une règle à calculs, qui donne toute l'approximation requise des mesures industrielles.

8. Si le résultat final vous paraît faux, cherchez d'abord si vous n'avez pas fait d'erreurs de calcul.

Examinez ensuite si l'échec n'est pas dû à une mauvaise exécution de la manipulation ou à l'imperfection des instruments. La critique judicieuse que vous ferez de votre travail vous sera aussi profitable que la manipulation même.

9. S'il vous arrive de détériorer un instrument par maladresse ou accident, signalez-le spontanément à votre professeur; peut-être vous grondera-t-il, mais soyez certain qu'il vous estimera pour votre franchise.

III. — Après avoir quitté le laboratoire ou la salle d'essais.

1. Il vous sera souvent demandé de rédiger un compte rendu de votre manipulation. La qualité essentielle d'un tel travail est la clarté. Elle suppose la concision. *Exprimez-vous de préférence par dessins, schémas et graphiques.*

Utilisez du papier millimétrique et employez des échelles simples, que vous indiquerez sur le graphique en graduant les axes de coordonnées.

2. Et surtout, ne « truquez » pas vos résultats d'expériences pour obtenir un nombre final qui vous paraît préférable à celui que vous avez honnêtement trouvé. N'oubliez jamais que tout travail scientifique, même d'un débutant, est œuvre de ***vérité*** et de ***sincérité.***

Ire PARTIE

MESURES DE LABORATOIRE

INTRODUCTION

Notions sur les erreurs et les approximations numériques

A. — Erreurs de mesures.

1. — Les imperfections d'une mesure.

La seule opération que l'homme sache faire rigoureusement est le dénombrement des éléments d'un ensemble : par exemple compter le nombre de moutons d'un troupeau. Toute mesure d'une grandeur telle que masse, longueur, courant, tension, etc. est, au contraire, le résultat d'une opération expérimentale[1] ***forcément imparfaite :*** elle comporte donc une certaine incertitude.

2. — L'incertitude provient de l'instrument et de l'opérateur.

Voici un cylindre soigneusement rectifié; en mesurant son diamètre avec un bon pied à coulisse (vernier au cinquantième). Nous trouvons par exemple 25,03 mm.

Mais un instrument de mesure n'est jamais parfait : la perfection n'appartient pas au monde du technicien. Le pied à coulisse présente des défauts, plus ou moins grands selon sa qualité, mais inévitables : manque de parallélisme et de rigidité des becs, jeu dans la coulisse, largeur et irrégularité des traits de la graduation.

L'opérateur n'est pas, lui non plus, parfait : le serrage sur la pièce, obligatoire, peut être trop énergique; la lecture du vernier comporte un jugement influencé par la direction de l'éclairage, par l'obliquité de l'observation, etc. Remarquez que l'effet de certaines imperfections de l'instrument peut être atténué par l'habileté de l'opérateur. Obtenir une très bonne mesure exige toujours de l'intelligence et souvent de l'habileté.

3. — Définissons l'erreur absolue.

Demandons la mesure du diamètre de notre cylindre à un laboratoire de métrologie bien outillé : il nous répondra, par exemple, 25,035 mm.

1. D'après les normes cette opération s'appelle un mesurage; une mesure est le nombre résultat d'un mesurage. Cette terminologie n'est pas encore entrée dans les habitudes des techniciens.

Pour nous c'est la valeur exacte[1]. Bien que nous n'ayons aucune maladresse à nous reprocher, nous avons commis une certaine erreur dans la mesure au pied à coulisse.

Par définition on appelle e_a, ***erreur absolue***, dont est affectée une mesure l, la différence entre l et la valeur exacte L : $e_a = l - L$.

Notre mesure du cylindre au pied à coulisse est affectée (entachée) d'une erreur absolue 25,03 — 25,035 = — 0,005 mm soit, — 5 microns.

Le signe — indique que la valeur que nous avons trouvée est trop petite; notre mesure est approchée ***par défaut.***

Un autre opérateur mesurant le même cylindre trouve 25,04; il commet une erreur absolue de 25,04 — 25,035 = + 0,005 mm. Sa mesure est approchée ***par excès.***

4. — L'erreur relative est plus significative que l'erreur absolue.

Par définition l'erreur relative e_r est le rapport de l'erreur absolue à la valeur exacte $e_r = \dfrac{l - L}{L}$.

Elle s'exprime souvent en pourcentage.

Dans notre mesure $e_r = \dfrac{-0{,}005}{25{,}035} = -0{,}0002$ ou — 0,02 %.

Le simple bon sens montre qu'il est superflu de donner plus d'un ou deux chiffres significatifs dans un tel calcul.

Mieux que l'erreur absolue, ***l'erreur relative nous donne une idée de la difficulté de la mesure.*** Par exemple il est enfantin de ne pas commettre une erreur absolue de plus de 1 cm sur une règle de 1 m, alors qu'il est très difficile de ne pas commettre la même erreur absolue sur une distance de 100 m. Dans le premier cas l'erreur relative est 1/100; dans le deuxième elle est 1/10 000 : une mesure est d'autant plus délicate qu'elle doit comporter une erreur relative plus petite.

5. — Pratiquement.

Lorsqu'on effectue une mesure on ne connaît pas la valeur exacte[2] (si non pourquoi ferait-on la mesure?) On est donc obligé d'***estimer*** l'erreur maximale que l'on peut commettre dans les conditions où l'on opère.

Par exemple avec notre pied à coulisse il est raisonnable d'estimer que l'on ne doit pas commettre d'erreur absolue (en plus ou en moins) supérieure à 0,01 mm : la valeur exacte est comprise entre 25,03 — 0,01 et 25,03 + 0,01. C'est ce qu'on exprime en disant que la mesure est

1. Un laboratoire encore mieux outillé donnerait un résultat encore plus précis par exemple 25,0353. C'est cette valeur que le laboratoire bien outillé prendrait comme valeur exacte pour déterminer ses erreurs. Pour nous, usager du pied à coulisse, il nous suffit de prendre 25,035 comme valeur exacte.

2. Il arrive cependant que l'on effectue avec un instrument la mesure d'une grandeur dont on connaît la valeur exacte par un autre instrument plus parfait. C'est une opération dite étalonnage — voir 1re Manipulation.

approchée à 0,01 mm près ou que le diamètre recherché est 23,03 $\pm$ 0,01.

Il est ***probable*** que notre erreur est inférieure à 0,01 mm. On augmente cette probabilité en répétant la mesure plusieurs fois en utilisant si possible plusieurs opérateurs également habiles et en prenant la ***moyenne*** des mesures ainsi effectuées.

6. — Une méthode mal adaptée provoque des erreurs systématiques.

Un conducteur parcouru par un courant s'échauffe par effet Joule et prend une température limite. Tentons de mesurer celle-ci en mettant le réservoir d'un thermomètre en contact avec le conducteur. Par le jeu normal des déperditions de chaleur le réservoir prend une température bien inférieure à celle du conducteur. Or un thermomètre n'a jamais mesuré que la température de son réservoir; notre mesure est entachée d'une énorme ***erreur systématique.*** Ce n'est pas le thermomètre qui est faux : c'est notre méthode qui est mauvaise.

Un accumulateur de 6 volts alimente en série deux résistances de 1 000 Ω chacune[1]; la tension aux bornes de chaque résistance est évidemment la moitié de 6 volts, soit 3 volts. Pour le vérifier branchons aux bornes d'une des résistances un voltmètre de 1 000 Ω de résistance. La résistance équivalente au voltmètre et à la résistance en parallèle est 500 Ω et la tension aux bornes de cet ensemble n'est plus la moitié mais le tiers de 6 volts. Si bien que nous lisons 2 volts et non 3 sur le voltmètre qui ne mesure jamais que la tension entre ses bornes comme le thermomètre ne mesure jamais que sa propre température. En branchant le voltmètre nous avons profondément ***modifié la tension que nous nous proposions de mesurer.*** Notre méthode est mauvaise : il faut en employer une autre (voir 15^{e} manipulation).

Il faut choisir des méthodes qui ne présentent pas d'erreurs systématiques (ou dont l'erreur systématique peut être calculée pour en corriger la mesure). Il ne doit plus subsister que les erreurs, *dites* accidentelles, dues à l'instrument et à l'opérateur.

7. — La précision des appareils de mesure est réglementée.

La Commission électrotechnique internationale (C. E. I.) classe les appareils de mesure électrique d'après leur précision. Les ***classes*** sont désignées par les nombres 0,1 0,2 0,5 1 1,5 2,5.

Ces nombres indiquent en pourcentage du ***calibre*** (c'est-à-dire du maximum mesurable avec l'instrument) l'erreur absolue maximale que l'on peut commettre.

Ainsi avec un ampèremètre de calibre 10 A et de classe 1 on ne commet pas d'erreur absolue supérieure à $10 \times \frac{1}{100} = 0{,}1$ A. Pour un courant

1. On suivra mieux le raisonnement en faisant la figure.

mesuré voisin de 10 A l'erreur relative est 1 %; mais pour un courant moitié elle monte à 2 %. Ce qui montre que pour faire de bonnes mesures il ne faut pas hésiter à changer de sensibilité ou d'instrument lorsque la déviation est trop petite.

Les appareils de classe 0,1 sont exceptionnels : ils sont utilisés comme référence dans les grands laboratoires. Ceux de la classe 0,2 sont dits étalons; ceux des classes 0,5 et 1 sont utilisés dans les essais; ceux de classe 1,5 et 2,5 sont ceux de la pratique courante.

Les conditions d'emploi (température, fréquence, protection contre les champs magnétiques, etc.) telles que les garanties de précision soient respectées sont précisées dans les publications C. 42 de la C. I. E.

Le symbole de la catégorie de l'appareil est imprimé sur le cadran. S'y ajoutent des signes indiquant la nature du mécanisme mobile de l'instrument, du courant pour lequel il est construit, la position dans laquelle il doit être utilisé, la tension d'isolement à laquelle il a été essayé.

Les principaux de ces symboles sont rassemblés dans le tableau suivant :

APPAREILS	SYMBOLES	APPAREILS	SYMBOLES
à cadre mobile, aimant fixe		pour courant continu	
à fer mobile		pour courant alternatif	
électrodynamique		pour courants triphasés à charges égales	
d'induction		à utiliser en plaçant le cadran verticalement	
thermique à fil chaud		à utiliser en plaçant le cadran horizontalement	
à cadre mobile et redresseur		à utiliser en plaçant le cadran dans une position inclinée	
avec blindage fer		dont l'isolement a été essayé à 2 *kV*	

Par exemple, la figure 1 relevée sur le cadran d'un instrument doit se lire : *wattmètre électrodynamique de la classe* 0,5. *conforme aux prescriptions de la Commission électrotechnique internationale, muni d'un blindage en fer, à employer horizontalement, dont l'isolement a été essayé à* 2 *kV*.

Fig. 1. — Symboles imprimés sur le cadran d'un wattmètre.

B. — Approximation dans les calculs.

1. — L'incertitude sur une grandeur calculée.

Souvent, la valeur d'une grandeur résulte d'un calcul où entrent d'autres grandeurs directement mesurées, donc soumises à une certaine incertitude.

Ainsi la puissance absorbée par un récepteur à courant continu peut être calculée à partir des lectures U et I du voltmètre et de l'ampèremètre par la formule $P = U.I$; la résistance d'un conducteur par la formule d'Ohm $R = U : I$.

L'objet du ***calcul des approximations*** est la détermination de l'erreur maximale qui peut entacher la grandeur calculée, à partir des erreurs maximales qui affectent chaque grandeur entrant dans la formule. Nous désignerons par une lettre telle que a la valeur mesurée ou calculée d'une grandeur, et par Δa l'erreur absolue maximale dont elle peut être affectée. Cette erreur peut être positive ou négative. La valeur exacte est donc comprise dans les limites $a \pm \Delta a$ et l'erreur relative maximale est $\Delta a/a$.

2. Cas d'une somme.

Des mesures i_1, i_2, i_3 des courants partiels (fig. 2) nous déterminons le courant I avant bifurcation par la formule $I = i_1 + i_2 + i_3$. Si par ***malchance*** les 3 mesures sont entachées de leurs erreurs ***maximales*** Δi_1, Δi_2, Δi_3 et dans le ***même sens***, la détermination de I par le calcul est entachée d'une erreur

$$\Delta I = \Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3.$$

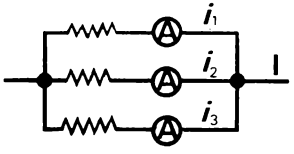


Fig. 2. — Les *erreurs absolues* commises dans la mesure des courants partiels se cumulent dans la somme $I = i_1 + i_2 + i_3$.
L'*erreur relative* sur I est comprise entre la plus petite et la plus grande des erreurs relatives sur i_1, i_2 et i_3.

C'est l'erreur maximale que l'on peut commettre sur I.

1. Dorénavant nous dirons simplement erreur relative au lieu d'erreur relative maximale lorsque aucune confusion n'est à craindre; de même pour l'erreur absolue.

D'une façon générale dans une somme les ***erreurs absolues (maximales) s'ajoutent***

L'erreur relative correspondante est $\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3}{i_1 + i_2 + i_3}$.

On démontre qu'elle est comprise entre la plus petite et la plus grande des erreurs relatives $\frac{\Delta i_1}{i_1}$, $\frac{\Delta i_2}{i_2}$, $\frac{\Delta i_3}{i_3}$.

Dans le cas, assez fréquent, où tous les termes de la somme sont connus avec la même erreur relative, la somme elle-même est entachée de la même erreur relative[1] :

$$\frac{\Delta i_1}{i_1} = \frac{\Delta i_2}{i_2} = \frac{\Delta i_3}{i_3} = \frac{\Delta i_1 + \Delta i_2 + \Delta i_3}{i_1 + i_2 + i_3} = \frac{\Delta I}{I}.$$

3. — Cas d'une différence.

Soit une grandeur D calculée par la différence de deux grandeurs. N et N′ : D = N — N′. Si par malchance l'erreur sur D est maximale dans un sens alors que l'erreur sur N′ est maximale en sens contraire, l'erreur sur D est égale à la somme des erreurs :

$$\Delta.D = \Delta N + \Delta N'.$$

Comme dans le cas de l'addition les erreurs absolues s'ajoutent. Mais, contrairement au cas de l'addition, l'erreur relative (maximale) $\frac{\Delta N + \Delta N'}{N - N'}$ est toujours plus grande que la plus grande des erreurs relatives affectant N et N′. Elle peut devenir inacceptable lorsque N et N′ sont voisins.

Exemple. Un moteur à courant continu excité en dérivation et alimenté à tension constante ralentit légèrement lorsqu'on le charge. Avec un tachymètre à main donnant une erreur maximale relative de 1 %, on mesure à vide N = 1 000 tr/mn, en charge. N′ = 950 tr/mn. On calcule la diminution de vitesse D = N — N′ = 50 tr/mn.

Or N peut être entaché d'une erreur absolue $\pm$ ΔN = 1 000/100 = 10 tr/mn. Il en est pratiquement de même pour N′ :

$$\pm \Delta N' = 950/100 = 9{,}5 \simeq 10 \text{ tr/mn}.$$

Erreur absolue maximale ΔD = 10 + 10 = 20 tr/mn.
— relative — ΔD/D = 20/50 = 40 %.

C'est une erreur inacceptable : il faut utiliser un tachymètre beaucoup plus précis.

La mesure d'une grandeur par le calcul de la différence de deux grandeurs approchées voisines l'une de l'autre est donc à éviter.

1. En effet si l'on a une suite de rapports égaux, on obtient encore le même rapport en faisant la somme des numérateurs et la somme des dénominateurs.

4. Cas d'un produit.

Soit à déterminer la puissance P watts d'un récepteur à courant continu qui absorbe I ampères sous U volts.

Appliquons la formule $P = UI$.

Nous avons l'erreur maximale ΔP sur P, lorsque les erreurs maximales ΔU et ΔI sont de même sens, par exemple par excès. On a alors :

$$P + \Delta P = (U + \Delta U)(I + \Delta I) = UI + U\Delta I + I\Delta U + \Delta U.\Delta I.$$

D'où, en négligeant le terme $\Delta U.\Delta I$ qui est petit devant les autres, ***l'erreur absolue*** $\Delta P = I\Delta U + U\Delta I$ et l'erreur relative

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{I\Delta U + U\Delta I}{UI} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}.$$

Dans un produit les ***erreurs relatives s'ajoutent*** si U et I sont approchés à 0,01 près, la puissance l'est à 0,02 près.

5. — Cas d'une puissance et d'une racine.

L'expression $y = x^n$ est un produit, puisque $y = x.x...x$. En appliquant la règle établie pour un produit :

l'erreur relative sur une puissance $n^{ième}$ d'un nombre approché a pour limite supérieure n fois l'erreur relative sur ce nombre.

Une racine telle que $y = \sqrt[n]{x}$ est une puissance fractionnaire $y = x^{\frac{1}{n}}$, donc :

l'erreur relative de la racine $n^{ième}$ d'un nombre approchée a pour limite supérieure le quotient par n de l'erreur relative de ce nombre.

6. — Cas d'un quotient.

Soit à déterminer la résistance d'un conducteur qui est parcouru par un courant I quand la tension à ses bornes est U.

Calculons R par la formule $R = U/I$. L'erreur sur R sera maximale lorsque les erreurs sur U et I sont en sens inverse, par exemple U par excès, I par défaut. On a alors $R + \Delta R = \frac{U + \Delta U}{I - \Delta I}$. D'où l'on déduit successivement.

$$\Delta R = \frac{U + \Delta U}{I - \Delta I} - R = \frac{U + \Delta U}{I - \Delta I} - \frac{U}{I} = \frac{I\Delta U + U\Delta I}{(I - \Delta I)I} \simeq \frac{I\Delta U + U\Delta I}{I^2}.$$

En divisant le 1er membre par R et le dernier par la quantité égale U/I on obtient finalement

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}.$$

Pour un quotient (comme pour un produit) les ***erreurs relatives s'ajoutent.***

7. — Résumé des règles de calcul des erreurs relatives.

OPÉRATIONS	LIMITE SUPÉRIEURE DE L'ERREUR RELATIVE
Somme : $S = A + B + C$	L'erreur relative $\frac{\Delta S}{S}$ de S est inférieure à la plus grande des erreurs relatives $\frac{\Delta A}{A}, \frac{\Delta B}{B}, \frac{\Delta C}{C}$.
Différence : $D = A - B$	L'erreur relative $\frac{\Delta D}{A-B}$ peut être très grande si A et B sont voisins.
Produit : $P = A \times B + C$	$\frac{\Delta P}{P} < \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$.
Puissance : $Y = X^n$	$\frac{\Delta Y}{Y} < n \frac{\Delta X}{X}$
Quotient : $Q = A : B$	$\frac{\Delta Q}{Q} < \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$
Racine : $Z = \sqrt[n]{A}$	$\frac{\Delta Z}{Z} < \frac{1}{n} \frac{\Delta A}{A}$.

8. — Comment utiliser les règles ci-dessus ?

Elles nous permettent souvent de comparer la précision de différentes méthodes de mesure possibles d'une même grandeur. Par exemple a égalité de classe de précision des instruments il vaut mieux mesurer la puissance P avec un wattmètre, plutôt que d'utiliser un ampèremètre et un voltmètre et de calculer par la formule P = UI. Dans ce dernier cas on double l'erreur relative.

Mais il faut se rappeler que ces règles donnent l'erreur ***maximale***, celle que commet un opérateur que la malchance poursuit inlassablement : l'erreur ***probable est inférieure.*** Une étude sérieuse des erreurs relève de calculs difficiles de probabilité.

Les règles simples que nous avons données fournissent des limites extrêmes heureusement jamais atteintes pratiquement.

***

C. — Moyenne de mesures et courbes figuratives.

1. — Parmi plusieurs valeurs approchées d'une même grandeur, laquelle faut-il choisir ?

Quand il est facile de varier les conditions expérimentales, on effectue souvent trois ou quatre mesures successives de la grandeur à évaluer. On obtient alors des résultats approchés qui, en général, diffèrent les uns des autres. Pour que la mesure soit bonne, il est *nécessaire* que ces nombres expérimentaux soient voisins, mais cette condition n'est pas *suffisante*, parce que les mêmes causes d'erreurs peuvent agir dans les expériences successives. Retenons seulement que les valeurs approchées obtenues ne sont pas identiques.

Par exemple, pour mesurer une résistance par application de la loi d'Ohm, R = U : I, en faisant varier U et I, on a fait trois séries de mesures qui ont donné :

$$R_1 = 36{,}8\ \Omega, \qquad R_2 = 36{,}4\ \Omega, \qquad R_3 = 36{,}3\ \Omega.$$

Si aucune raison ne permet de choisir l'une de ces valeurs plutôt qu'une autre (mêmes qualités d'appareillage, même soin dans la mesure), *on convient d'adopter pour valeur approchée de la grandeur mesurée la* ***moyenne arithmétique*** *des différentes valeurs obtenues*, soit en l'espèce R = 36,5 Ω.

Cette convention n'est pas arbitraire. Elle résulte de propriétés de la moyenne arithmétique qu'établit une branche des mathématiques, nommée le calcul des probabilités.

2. — Courbe représentant les valeurs d'une grandeur en fonction d'une autre.

Souvent on cherche à établir expérimentalement comment une grandeur varie en même temps qu'une autre dont elle dépend.

Par exemple, la f. é. m. E d'une dynamo à excitation indépendante tournant à vitesse constante, varie quand l'intensité i du courant d'excitation change; en d'autres termes E est une fonction de i, $E = f(i)$.

Pour étudier expérimentalement cette variation, on mesure un certain nombre de valeurs de E correspondant à des valeurs de i. Les résultats de ces mesures sont consignés dans un tableau. Celui qui suit est emprunté au cours d'électricité[1].

F. É. M. D'UNE DYNAMO A 1 600 T/MN.

Intensité dans les inducteurs i =	1	0,8	0,65	0,5	0,25	0	ampère
F. é. m..... E =	140	127	114	95	48	3	volts

1. 6e leçon, *Électricité industrielle. Machines électriques.*

Une courbe est plus parlante qu'un tableau de nombres. Vous savez qu'on trace le plus souvent les courbes par rapport à deux axes de coordonnées rectangulaires, en portant les valeurs de la variable en abscisses et celles de la fonction en ordonnées (fig. 3).

Nous ne ferons à ce sujet que quelques remarques :

1° *Les échelles des abscisses et des ordonnées ne doivent pas être choisies indépendamment l'une de l'autre.* En effet, les valeurs numériques portées en ordonnées sont des valeurs approchées, et en exagérant l'échelle des ordonnées par rapport à celle des abscisses, on donne une telle importance aux écarts entre les valeurs approchées et les valeurs exactes inconnues que l'allure de la courbe devient difficile à apprécier. En exagérant l'échelle des abscisses, la courbe s'aplatit et ses changements de pente ou de courbure ne sont plus sensibles.

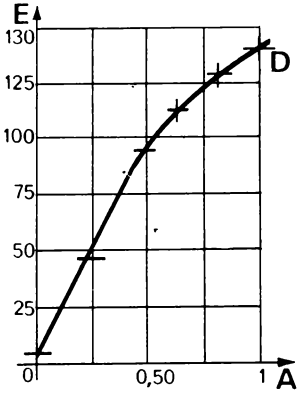


Fig. 3. — Caractéristique à vide d'une dynamo à excitation indépendante.

2° En toute rigueur, les valeurs numériques approchées ne devraient pas être représentées par des points.

Supposons que nous tracions la courbe $E = f(i)$ de la figure 4 à grande échelle, soit en abscisses 1 000 *mm* pour 1 ampère et en ordonnées 10 *mm* pour un volt. Si les intensités et les tensions ont été mesurées à 0,01 près, la valeur de i comptée pour 1 ampère est, en réalité, comprise entre 0,99 et 1,01 ampère, elle doit être représentée en abscisse par un trait long de 20 *mm*. L'ordonnée correspondante est une bande large de 20 *mm*.

La f. é. m. E comptée pour 140 volts est comprise entre 138,6 et 141,4 volts, il faut la représenter par une surface elliptique large de 20 *mm*, haute de 28 *mm*, à l'extrémité de l'ordonnée (fig. 4).

La courbe de E, au lieu d'être une ligne, est une bande s'élargissant depuis l'origine jusqu'aux valeurs élevées de E, si l'erreur relative est supposée constante.

3° Il est d'usage de représenter les courbes par des lignes. Des considérations qui précèdent, vous retiendrez qu'il ne faut pas s'astreindre à faire passer une courbe par tous les points représentatifs des mesures approchées. On la trace, en lui donnant une forme régulière, à travers la zone des points figuratifs en se guidant sur ce que l'on sait de l'allure du phénomène représenté.

Si quelque point est très écarté de la courbe, on le néglige, ou, mieux,

on recommence la mesure correspondante pour chercher la cause de la différence apparue.

En somme, une courbe est une sorte de moyenne graphique des mesures effectuées. On ne doit pas lui attribuer plus de précision qu'aux mesures qui ont servi à la tracer.

4° A l'aide d'une courbe, il est facile de déterminer graphiquement une valeur de la fonction pour une valeur de la variable comprise *entre* deux valeurs expérimentales. Par exemple, sur la figure 3 nous relevons que la valeur de E est 125 V pour $i = 0{,}75$ A.

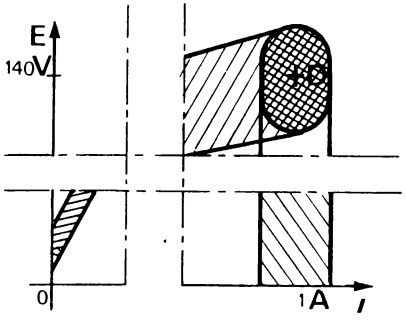


Fig. 4. — Portions de la courbe de la figure 4 tracée à grande échelle. C'est à l'intérieur de l'ellipse D que se trouve le point figurant la valeur exacte de la f. é. m. correspondant à la valeur approchée, 1A, de l'excitation.

Cette opération est une *interpolation*. Elle fournit un résultat d'une précision analogue à celle des mesures que la courbe résume.

Dans certains cas, on détermine, à partir de la courbe, la valeur de la fonction pour une valeur de la variable plus petite ou plus grande que toutes les valeurs expérimentales. Ainsi, de la courbe de la figure 3 nous tirons que pour $i = 1{,}50$ ampère, la f. é. m. E atteint 165 volts. Cette opération se nomme une *extrapolation*. N'accordons pas grand crédit au nombre qu'elle fournit, car il est possible que le phénomène change d'allure en dehors de la région étudiée expérimentalement.

Comparaison d'un ampèremètre ou d'un voltmètre à des appareils étalons.

1. — Les ampèremètres et les voltmètres diminuent peu à peu d'exactitude : il faut, de temps à autre, les étalonner.

En vieillissant, les aimants des appareils à cadre mobile et aimant fixe s'affaiblissent, rapidement d'abord, puis de plus en plus lentement. L'élasticité des spiraux de rappel des organes mobiles se modifie, surtout si l'ampèremètre ou le voltmètre ont supporté souvent des courants qui dépassent le calibre de l'instrument. Les chocs et les secousses pendant le transport des appareils détériorent les pivots. Pour obtenir des mesures suffisamment exactes avec de tels instruments, il faut corriger les lectures faites sur les échelles. Déterminer ces corrections, c'est « *étalonner* » les instruments.

2. — Les méthodes d'étalonnage les plus sûres sont des méthodes de laboratoire.

La plupart consistent, en principe, à déterminer les valeurs des intensités ou des tensions pour de nombreux points des échelles des appareils étudiés, en utilisant seulement des résistances étalonnées, une pile étalon et un galvanomètre de zéro. Ce sont des méthodes délicates que l'on ne peut employer que dans des laboratoires.

Dans l'industrie, on se contente souvent de comparer de temps à autre les appareils d'usage courant à des ampèremètres et voltmètres dits ***« étalons »*** dont on admet l'exactitude.

3. — Les ampèremètres et voltmètres étalons sont construits très soigneusement, avec des matériaux de choix.

Certains sont du type *à cadre mobile et aimant fixe*. Ils sont fabriqués avec des aimants assez vieux pour être stables et dont la constance de l'induction rémanente a été vérifiée. Les résistances addition-

nelles et les shunts en manganine ont été observés aussi pendant plusieurs mois et n'ont été définitivement ajustés qu'après être devenus pratiquement invariables.

La précision de ces étalons est $\pm$ 0,2 % du *maximum* de l'échelle. Les shunts des ampèremètres étalons et les résistances additionnelles des voltmètres étalons sont aussi exacts à $\pm$ 0,2 % près.

On fabrique aussi des *étalons électrodynamiques* qui comportent moins d'organes susceptibles de se modifier en vieillissant, mais dont la sensibilité est moindre et qui sont un peu influencés par le champ magnétique terrestre.

Ces appareils sont accompagnés d'une fiche d'étalonnage établie par le constructeur.

Pour qu'ils conservent longtemps leur exactitude, on ne les emploie qu'à des étalonnages; on ne les manie et les transporte qu'avec précaution.

A. — Vérification d'un ampèremètre à cadre mobile et aimant fixe.

1. — Principe de l'opération.

L'ampèremètre à vérifier et l'étalon sont traversés par le même courant; on lit les indications simultanées des deux appareils pour plusieurs valeurs de l'intensité.

2. — Montage des appareils.

La source de courant est un accumulateur capable de débiter l'intensité correspondant au calibre[1] de l'étalon.

Un rhéostat permet d'obtenir différentes valeurs de l'intensité (fig. 1).

L'ampèremètre à contrôler est monté, s'il y a lieu, sur un shunt de même calibre que l'ampèremètre étalon.

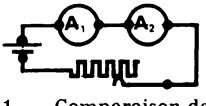


Fig. 1. — Comparaison de l'ampèremètre A_2 à l'ampèremètre étalon A_1.

Quand l'étalon est du type *électrodynamique*, un inverseur bipolaire sert à y renverser le sens du courant. On élimine l'influence du champ magnétique terrestre en prenant la moyenne de deux lectures pour la même intensité passant successivement dans les deux sens.

1. Le calibre ou les calibres d'un appareil de mesure sont les valeurs de la grandeur mesurée qui correspondent au maximum de l'échelle.

3. — Lecture.

Chercher à évaluer les cinquièmes de division de l'échelle pour chacun des appareils employés.

Les lectures seront notées dans un tableau du modèle suivant :

ÉTALONNAGE DE L'AMPÈREMÈTRE CC N° 364 375 AVEC SHUNT 20 AMPÈRES N° 1 278

Étalon : Ampèremètre électrodynamique W n° 17 236[1]

Numéro des lectures	LECTURES		Lectures corrigées de l'appareil étalon	Correction algébrique aux lectures de l'appareil vérifié
	Étalon (moyenne des deux lectures)	Appareil à vérifier		
1	2	3	4	5
1	2,3	2,3	2,3	0
2	3,1	3,2	3,1	— 0,1
3	5,5	5,8	5,5	— 0,3
4	7,2	7,5	7,2	— 0,3
5	9,9	10,4	9,9	— 0,5
6	11,9	12,6	11,9	— 0,7
7	14,6	15,4	14,6	— 0,8
8	16,4	17,4	16,4	— 1,0
9	18,4	19,6	18,4	— 1,2

4. — Calculs et résultats.

On prend la moyenne des deux lectures faites avec inversion du courant dans l'ampèremètre étalon. On corrige le nombre obtenu en tenant compte de la fiche d'étalonnage de l'étalon. Le résultat est inscrit dans la colonne 4 du tableau.

Les corrections à ajouter algébriquement aux lectures sur l'échelle à vérifier sont inscrites dans la colonne 5.

5. — Tableau et courbes d'étalonnage.

1° Un tableau constitué par les colonnes 3 et 5 de celui du paragraphe 3 suffit pour déterminer, par interpolation, la correction convenable pour une valeur déterminée relevée sur l'échelle de l'appareil.

Par exemple à la lecture 8,5 comprise entre 7,5 dont la correction est — 0,32 et 10,4 dont la correction est — 0,54 on ajoutera algébriquement — 0,39 et l'on obtiendra 8,11.

2° On peut remplacer le tableau par une courbe donnant les corrections en fonction des lectures sur l'échelle (fig. 3).

3° Il est possible aussi de se servir de la courbe des intensités corrigées en fonction des intensités lues tracée à grande échelle.

1. Remarquez que la colonne 4 est identique à la colonne 2 : c'est que cet ampèremètre est exact à l'approximation de la lecture de sa graduation.

Remarquez qu'une lecture corrigée ne fournit pas la valeur exacte de

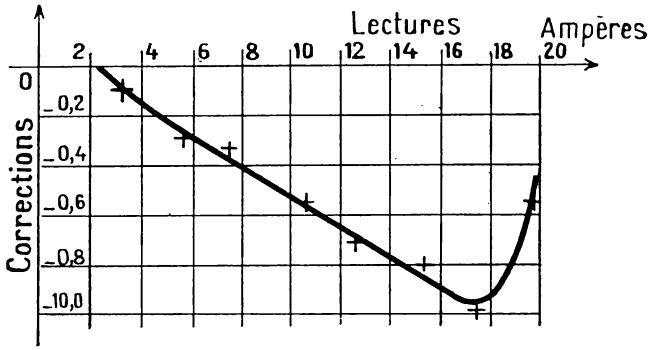


Fig. 3. — Courbe des corrections à faire subir aux intensités lues sur l'échelle de l'ampèremètre étalonné.

la grandeur mesurée, mais seulement une valeur plus approchée que la lecture brute.

B. — Vérification d'un ampèremètre électromagnétique.

On procédera de la même façon en effectuant deux séries de mesures, l'une par valeurs croissantes, jusqu'au maximum de l'échelle à vérifier l'autre par valeurs décroissantes.

Si les deux courbes traduisant les résultats ne coïncident pas, c'est que le fer des palettes fixe et mobile possède de l'hystérésis.

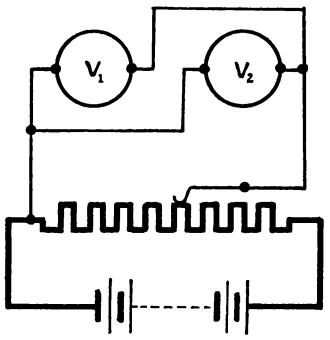


Fig. 4. — Comparaison du voltmètre V_1 au voltmètre étalon V_2.

C. — Vérification d'un voltmètre à cadre mobile et aimant fixe.

Le voltmètre à vérifier et le voltmètre étalon, de même calibre, sont montés en dérivation aux bornes d'un *potentiomètre*[1] ou d'une résistance traversée par un courant réglable.

1. Voir *Électricité industrielle*, 1er volume, 18e leçon.

Un inverseur est monté aux bornes de l'étalon s'il est du type électrodynamique (fig. 4).

Les lectures sont inscrites dans un tableau identique au précédent.

On tracera aussi la courbe de l'échelle corrigée comme il a été indiqué.

D. — Vérification d'un voltmètre électromagnétique.

Comme pour l'ampèremètre, on effectuera deux séries de mesures l'une par valeurs croissantes, l'autre par valeurs décroissantes.

Remarque. — Si les courbes d'étalonnage tracées plusieurs années auparavant ont été conservées, il sera instructif de les comparer à celles que l'on vient d'obtenir.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un ampèremètre étalon électrodynamique, 5-10 ampères.
Un voltmètre étalon électrodynamique, 150 volts.
Un rhéostat, 5 ohms, 10 ampères.
Un potentiomètre, 50 ohms, 2 ampères.
Un élément d'accumulateurs, 40 ampères-heures.
Une source de courant 110 volts, 2 ampères.
Appareils à vérifier.

Mesure industrielle d'une résistance moyenne avec un ampèremètre et un voltmètre.

1. — La méthode est une application de la loi d'Ohm : $R = \frac{U}{I}$.

Dans la résistance R ohms à évaluer, on fait passer un courant continu. On mesure l'intensité I ampères avec un ampèremètre ; et, avec un voltmètre, la tension U volts aux bornes de la résistance.

Cette méthode ne convient que pour les résistances mortes, puisque la formule simple d'Ohm ne s'applique pas quand il existe dans le circuit une force électromotrice ou contre-électromotrice.

2. Elle présente quelques causes d'erreurs systématiques.

1° Le courant échauffe la résistance qui, dans presque tous les cas, varie avec la température.

Par exemple, si la résistance R est en cuivre, elle augmente environ de quatre millièmes de sa valeur par degré. Si le courant accroît la température de R de 10 degrés, au lieu de R, on mesure 1,04 R ; l'erreur relative est de 0,04.

2° Pour que les lectures de l'ampèremètre et du voltmètre puissent être simultanées, les deux appareils sont en circuit en même temps.

On les monte, soit comme l'indique la figure 1 et le voltmètre est dit *en amont*, soit comme l'indique la figure 2 et le voltmètre est dit *en aval*. Dans les deux cas, il y a une cause d'erreur.

Montage amont. — Le voltmètre mesure la tension U aux extrémités de la résistance, augmentée de la tension u aux bornes de l'ampèremètre.

Au lieu de $R = \frac{U}{I}$, la valeur trouvée pour la résistance est

$$R' = \frac{U + u}{I} = \frac{U}{I} + \frac{u}{I} = R + r$$

étant la résistance de l'ampèremètre.

L'erreur absolue commise est R′ — R = r et l'erreur relative r : R. r est faible : sa valeur pour un ampèremètre de contrôle, est souvent

$$r = \frac{0{,}1}{s} \text{ ohm}$$

s étant le calibre en ampères du shunt.

Si R est petit, la limite supérieure de l'erreur relative est grande; si R est grand, la limite est petite.

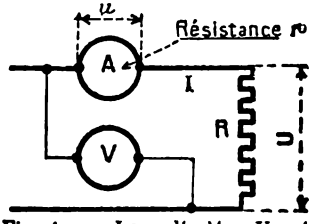


Fig. 1. — Le voltmètre V est monté en amont de l'ampèremètre A : erreur relative inférieure à r : R. Ce montage convient aux grandes résistances.

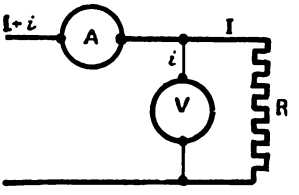


Fig. 2. — Le voltmètre V est monté en aval de l'ampèremètre A : erreur relative inférieure à i : I. Ce montage convient aux faibles résistances et aux grandes intensités.

Par exemple, quand on emploie un ampèremètre avec un shunt de 3 ampères

$$r = 0{,}033 \text{ ohm.}$$

Si l'on mesure une résistance R = 0,33 ohm

$$\frac{r}{R} = \frac{0{,}033}{0{,}33} = 0{,}1$$

Dans le cas où R = 330 ohms :

$$\frac{r}{R} = \frac{0{,}033}{330} = 0{,}000\ 1$$

Donc *le montage amont du voltmètre convient quand la résistance à mesurer est grande.*

Montage aval. — L'ampèremètre mesure un courant I′ qui est la somme de l'intensité I dans la résistance et de l'intensité i dans le voltmètre.

Au lieu de R = U : I, la valeur trouvée pour la résistance est

$$R' = \frac{U}{I + i'}$$

d'où une erreur absolue de

$$R - R' = \frac{U}{I} - \frac{U}{I + i} = \frac{Ui}{I\,(I + i)}$$

moindre que

$$\frac{Ui}{I^2} = R\,\frac{i}{I}$$

L'erreur relative est donc moindre que $i : I$.

Or le courant maximum dans un voltmètre de contrôle est en général 0,005 ampère. Donc l'erreur relative due au montage aval est inférieure à 0,005 quand l'ampèremètre mesure 1 ampère ou davantage.

Précisons en reprenant à peu près les exemples numériques qui précèdent. Quand on mesure une résistance R = 0,33 ohm en utilisant une intensité de I = 10 ampères, le montage aval cause une erreur relative

$$0{,}005 : 10 = 0{,}000\,5.$$

Quand on mesure une résistance de 330 ohms avec un courant de 0,25 ampère, l'erreur relative due au montage aval est inférieure à

$$0{,}005 : 0{,}25 = 0{,}02.$$

Donc *le montage aval s'impose quand la résistance à mesurer est faible et qu'on emploie des courants intenses.*

3. — A l'erreur due au mode de montage s'ajoute celle qui provient des appareils de mesure.

Vous savez que R étant calculé par la formule $R = U : I$, une limite supérieure de l'erreur relative possible est :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}.$$

Or, en employant des appareils de contrôle en bon état et récemment étalonnés, l'erreur relative possible sur une lecture est 0,01. Donc, *la mesure d'une résistance avec un ampèremètre et un voltmètre peut être entachée d'une erreur relative de* 0,02 *du fait des instruments.*

En tenant compte, en plus, des causes d'erreurs signalées au paragraphe 2, on voit que la méthode est fort peu précise.

4. — La connaissance de l'ordre de grandeur des quantités à mesurer aide à choisir les appareils convenables.

Un électricien un peu expérimenté sait souvent à priori l'ordre de grandeur d'une résistance qu'il doit mesurer.

Par exemple, s'agit-il de mesurer la résistance des inducteurs d'un moteur à courant continu, excité en dérivation, de 5 chevaux, 130 volts? En fonctionnement normal, le courant d'excitation du moteur est de l'ordre de 1 ampère, ce qui correspond à une résistance dépassant un peu 100 ohms.

Le choix des appareils est donc facile :

1° on utilisera une source de courant d'une centaine de volts;

2° le calibre du voltmètre sera de 150 volts, celui de l'ampèremètre, 3 ampères;

3° le voltmètre sera monté en amont; un rhéostat de 20 à 40 ohms supportant 2 ampères, sera monté en série dans le circuit.

5. — Montage des appareils.

La disposition en est indiquée par la figure 3.

Les appareils de mesure seront éloignés de toute masse métallique et surtout des carcasses de moteurs ou de génératrices.

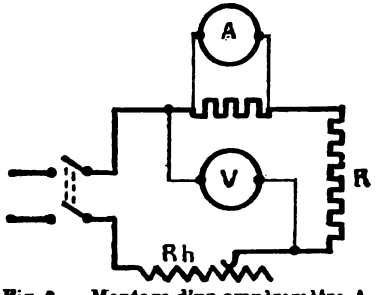


Fig. 8. — Montage d'un ampèremètre A, d'un voltmètre V et d'un rhéostat Rh pour mesurer la résistance R.

6. — Lectures et calculs.

Tracez d'abord un tableau pour y inscrire clairement les lectures d'instruments et les calculs que comporte la mesure. Ce tableau doit permettre d'identifier ultérieurement, si besoin est, les appareils de mesure employés.

MESURE DE LA RÉSISTANCE DE .....
Ampèremètre n° ..... avec shunts n°.....
Voltmètre n° .....

LECTURES				CALCULS		
AMPÈREMÈTRE 100 divisions 1	shunt 2	VOLTMÈTRE 150 divisions 3	calibre 4	I toutes cor ect. effectuées 5	U toutes correct. effectuées 6	$R = \frac{U}{I}$ 7
27,2	3 A	112,5	150 V	0,828 A	112,9 V	136,7
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Moyenne des résultats : 138 Ω.

Faites au moins trois séries de lectures sans vous préoccuper des calculs pour apporter toute votre attention aux expériences. Appréciez au cinquième la position de l'aiguille entre les graduations des échelles des appareils.

Toutes lectures effectuées, calculez les intensités et les tensions mesurées en tenant compte du calibre de l'ampèremètre shunté, de la sensibilité du voltmètre, ainsi que des corrections d'étalonnage des instruments, s'il y a lieu. Calculez la résistance avec quatre chiffres signi-

ficatifs. Faites la moyenne arithmétique et ne conservez que trois chiffres significatifs, dont le dernier est incertain.

C'est seulement quand ces calculs sont terminés qu'il convient ici de démonter les appareils.

Applications.

A. Mesurer la résistance de tous les rhéostats du laboratoire. Inscrire le résultat sur les appareils.

B. Mesurer la résistance des inducteurs et de l'induit de quelques moteurs à courant continu, d'un fer à repasser, d'un réchaud électrique, etc...

C. Mesurer la résistance d'une lampe à incandescence de 100 ou 200 watts pour diverses valeurs de la tension à ses bornes. Tracer la courbe de R en fonction de U.

(Cette lampe sera conservée pour en mesurer la résistance à froid au pont de Wheatstone.)

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Une boîte de contrôle à cadre mobile pour courant continu.
Rhéostats divers.
Source de courant : accumulateurs ou secteur continu.

Mesure d'une faible résistance par comparaison à un shunt d'ampèremètre.

1. — Principe de la mesure des résistances de l'ordre du millième d'ohm.

La résistance à mesurer x et un shunt d'ampèremètre s, qui sert de résistance étalon, sont montés en série. On les fait traverser par un courant I.

On branche un milliampèremètre successivement aux bornes de x et de s; soient n et n' les déviations de l'aiguille (fig. 1). Ces déviations sont proportionnelles aux chutes de tension xI et sI dans x et dans s, donc :

$$\frac{xI}{sI} = \frac{n}{n'} \text{ et } x = s \times \frac{n}{n'}$$

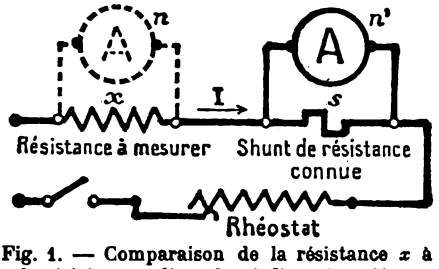


Fig. 1. — Comparaison de la résistance x à la résistance s d'un shunt d'ampèremètre

Cette méthode est précise :

1° Le milliampèremètre absorbe une intensité inférieure à 0,01 ampère, donc faible par rapport à I qui peut atteindre plusieurs dizaines d'ampères, et l'on peut admettre que l'intensité dans le circuit est la même, que le milliampèremètre soit branché ou non;

2° Le milliampèremètre n'a pas besoin d'être étalonné; il suffit que les indications de son aiguille soient proportionnelles aux intensités qui le traversent;

3° Les shunts sont étalonnés avec précision, leur résistance est déterminée à $\pm$ 0,2 % près.

2. — Choix et montage des appareils.

On choisit un shunt dont la résistance (poinçonnée sur la plaque de l'appareil) est de l'ordre de grandeur de la résistance à mesurer.

La source de courant est un élément d'accumulateur capable de fournir l'intensité maximum correspondant au calibre du shunt.

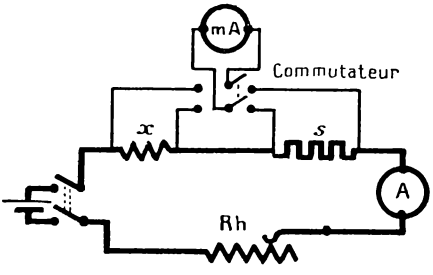


Fig. 2. — Montage des appareils pour la mesure d'une faible résistance.

Le montage est indiqué par la figure 2. L'ampèremètre en série dans le circuit n'est pas indispensable ; il sert à vérifier que l'intensité ne varie pas entre les mesures de n et de n'. Avec le rhéostat Rh, on fait varier l'intensité pour effectuer trois ou quatre lectures pour la même mesure.

3. — Lectures et calculs.

Vous les inscrirez dans un tableau du modèle que voici :

MESURE DE LA RÉSISTANCE DE.....
par comparaison au shunt n°.....
et au shunt n°.....

LECTURES			CALCULS
RÉSISTANCE s DU SHUNT ÉTALON	n aux bornes de x	n' aux bornes de s	$x = s \times \frac{n}{n'}$
1	2	3	4
0,001 Ω	60,8	82,5	0,000 7486 Ω
.....	.....	.....	.....

Moyenne des résultats : 0,000 749 Ω.

Faites au moins deux séries de lectures avec un shunt; recommencez avec un autre de calibre voisin.

Calculez le résultat de chaque mesure avec quatre chiffres significatifs.

Arrêtez la moyenne finale au troisième chiffre significatif qui est incertain.

Applications.

A. — Résistivité d'un laiton.

Une tige cylindrique de laiton bien calibrée, de diamètre 5 millimètres, longue d'environ 30 centimètres, est munie de deux serre-fils pour y amener le courant. Elle est placée sur deux vés de laiton déterminant des contacts à une distance précise $l = 25$ centimètres (fig. 3).

On comparera la résistance R de cette tige à celle d'un shunt pour 10 ampères, 0,1 volt, avec trois valeurs différentes de l'intensité, puis à celle d'un shunt pour 30 ampères.

On mesurera avec précision le diamètre *d* de la tige de laiton. On calculera la section S, puis la résistivité ρ par la formule

$$\rho = R\frac{S}{l} \text{ ohm. centimètre.}$$

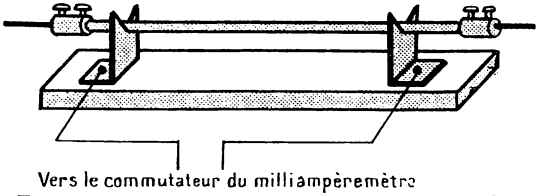


Fig. 3. — Montage pour mesurer la résistivité d'une tige cylindrique.

dans laquelle R est exprimé en ohms, S en centimètres carrés, *l* en centimètres.

B. — Résistivité d'un acier doux.

Même montage, mêmes mesures, avec une tige en acier doux étiré de 10 millimètres de diamètre.

C. — Résistivité d'une tôle « transformateur ».

Donner à une bande de cette tôle, longue d'environ 30 centimètres, une largeur précise de 20 millimètres. Nettoyer avec de la toile émeri fine les régions où l'on amènera le courant et celles où l'on prendra les tensions.

Comparer la résistance de cette tôle à celle d'un shunt de 3 ampères.

Mesurer l'épaisseur de la tôle au palmer. Calculer sa résistivité et la comparer à celle de l'acier doux étiré.

Matériel nécessaire à la manipulation.

Un ampèremètre de contrôle à cadre mobile et aimant fixe avec shunts de 3,10 et 30 ampères.

Un élément d'accumulateur de 40 ampères-heures.

Un rhéostat de 2 ohms, 20 ampères.

L'appareil de la figure 3.

Ampèremètre indicateur 0-20 ampères.

Mesure d'une grande résistance avec un voltmètre.

1. — Principe de la méthode de la mesure d'une résistance de l'ordre du millier d'ohms.

Soit un voltmètre dont la résistance est R = 30 000 ohms. Nous disposons d'une source de courant dont la tension, de l'ordre du calibre du voltmètre, reste constante pendant la mesure.

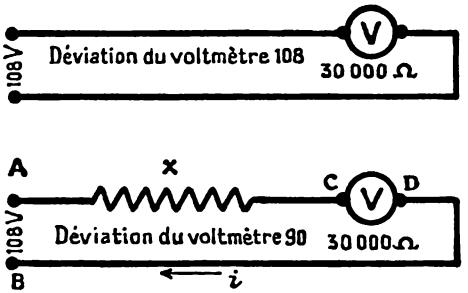


Fig. 1. — Principe de la mesure d'une grande résistance avec un voltmètre.

Branchons le voltmètre aux bornes de la source : il dévie jusqu'à la division $n_1 = 108$ (fig. 1).

Montons en série, sous la même tension, la résistance à mesurer x et le voltmètre : l'aiguille dévie jusqu'à la division $n_2 = 90$.

Dans le cas du second montage, l'intensité i peut être calculée de deux manières :

1° en considérant le circuit ACDB : $i = \dfrac{108}{x + 30\,000} = \dfrac{n_1}{x + R}$.

2° en considérant la portion de circuit CD : $i = \dfrac{90}{30\,000} = \dfrac{n_2}{R}$

Donc : $\dfrac{108}{x + 30\,000} = \dfrac{90}{30\,000}$ d'où $x = 6\,000$ ohms.

En utilisant les valeurs littérales :

$$\frac{n_1}{x + R} = \frac{n_2}{R} = \frac{n_1 - n_2}{x} \qquad \text{d'où} \qquad x = R\,\frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

Remarquons que c'est la différence des lectures faites au voltmètre qui intervient dans le calcul de x. Il en résulte que l'erreur relative possible

est grande, surtout si n_1 et n_2 ne diffèrent pas beaucoup, c'est-à-dire si la résistance inconnue n'est pas très grande : *la méthode n'est donc pas précise.*

2. — Choix des appareils.

Quand on connaît l'ordre de grandeur de la résistance à mesurer, on choisit un voltmètre ayant une résistance du même ordre.

La tension à employer est alors connue, puisqu'elle correspond au calibre du voltmètre.

On peut placer un interrupteur en dérivation aux bornes de la résistance à mesurer pour la court-circuiter quand elle ne doit pas être en circuit (fig. 2). Les mesures de n_1 et n_2 se succèdent alors très rapidement et la tension de la source n'a guère le temps de changer pendant qu'on les effectue.

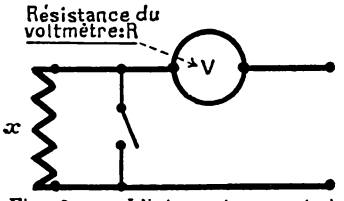


Fig. 2. — L'interrupteur sert à mettre la résistance x en court-circuit.

Applications.

A. — Mesure de la résistance d'une bobine de transformateur démontable (20 000 spires, fil 20/100).

Cette résistance est de l'ordre de 2 000 ohms.

1° Employer un voltmètre d'une résistance de 3 000 ohms, calibre 15 volts et un générateur de tension continue de 15 volts.

En se servant d'un potentiomètre, on pourra faire varier la tension et effectuer trois ou quatre mesures.

Les lectures et les calculs correspondants seront inscrits dans un tableau du modèle suivant :

MESURE DE LA RÉSISTANCE DE.....
avec le voltmètre n°.....

RÉSISTANCE R	LECTURES		CALCULS
du voltmètre	n_1	n_2	$x = R\,\frac{n_1 - n_2}{n_2}$
1	2	3	4
3 000 Ω	145,2	86,8	2 012 Ω
.....	.....	.....	.....
Moyenne des résultats :			

2° Recommencer les mesures en utilisant un voltmètre de 150 ohms et la distribution de courant continu sous tension de 110 volts.

B. — Mesures analogues à effectuer.

Résistance du circuit fil fin d'un wattmètre.
Résistance d'un voltmètre électromagnétique.

C. — Mesure de la résistance d'isolement d'un appareil ménager [1].

Comme dans tous les appareils électriques, les organes où passe le courant sont isolés de la carcasse. Par exemple, le fil chauffant d'un fer à souder est isolé de la masse de l'appareil par du mica et, à la broche d'entrée, par de la porcelaine.

Pourtant, si on applique la tension de la ligne d'amenée du courant d'une part à un pôle du fil de chauffe, d'autre part à la masse du fer, un faible courant, inférieur à un dix-millième d'ampère si l'appareil est en bon état, traverse les isolants. Ce *courant de fuite* montre et définit une *résistance d'isolement* entre la résistance chauffante et le reste de l'appareil :

$$\text{résistance d'isolement} = \frac{\text{tension appliquée}}{\text{courant de fuite}}.$$

Si cette résistance est faible, l'appareil peut être dangereux à employer. Il est utile de la mesurer au moins tous les ans. On peut employer la méthode du voltmètre. D'après les règlements de l'USE, la tension d'essai doit être au moins 100 volts.

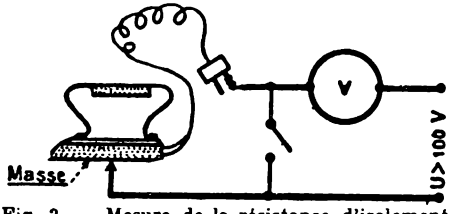


Fig. 3. — Mesure de la résistance d'isolement d'un fer à repasser.

Dans le cas d'un fer à repasser, le montage sera celui de la figure 3.

Si la résistance d'isolement d'un appareil ménager est inférieure à 1 mégohm, l'appareil est en mauvais état et doit être réparé.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un voltmètre de contrôle à cadre mobile, de grande résistance, à plusieurs calibres.
Un rhéostat potentiométrique.

1. Cette mesure sera reprise plus loin (14e Manipulation).

Mesure de la force électromotrice et de la résistance intérieure d'une pile ou d'un accumulateur.

Cette manipulation fournit l'occasion de discuter une méthode de mesure dans un cas très simple.

1. — Mesure de la f. é. m. d'un élément de pile ou d'accumulateur.

La f. é. m. est égale à la différence de potentiel entre les bornes de l'élément à *circuit ouvert.*

Nous la mesurerons très facilement en branchant sur l'appareil un voltmètre de calibre 0-3 volts.

Que vaut cette méthode de mesure?

1° Nous mesurons non pas la f. é. m. E, mais la tension U aux bornes de l'élément, qui n'est pas à circuit ouvert puisqu'il débite un courant dans le voltmètre.

Désignons par : I l'intensité de ce courant, R la résistance du voltmètre, r la résistance intérieure de l'élément. En appliquant la loi d'Ohm au circuit :

$$E = (R + r)\ I = \quad U + rI = \quad U + \frac{r}{R + r}\ E.$$

Prendre pour E la valeur U, c'est commettre une erreur absolue par défaut $\frac{r}{R + r}$ E et une erreur relative $\frac{r}{R + r}$. Donc :

a) Un voltmètre dont la résistance R est grande donne des résultats plus précis qu'un voltmètre peu résistant.

b) L'erreur est négligeable pour un élément d'accumulateur dont la résistance intérieure r est inférieure à 0,01 Ω, acceptable encore pour un petit élément Leclanché à vase poreux ($r \simeq 8$ Ω), inadmissible pour un élément étalon dont la résistance atteint 900 Ω.

2° Quand un élément de pile débite, il se polarise plus ou moins vite. Sa f. é. m. diminue, sa résistance intérieure augmente. C'est pourquoi

un élément étalon ne conserve une exactitude suffisante que s'il ne fournit pas plus de 0,001 ampère quand il s'agit d'un élément Daniell, pas plus de 0,0 001 A pour un élément Weston. Mesurer la f. é. m. d'un tel élément avec un voltmètre serait illusoire.

En somme, la mesure de la f. é. m. d'un élément de pile avec un voltmètre est facile, mais de peu de précision. Elle convient seulement pour des piles usuelles ou des accumulateurs.

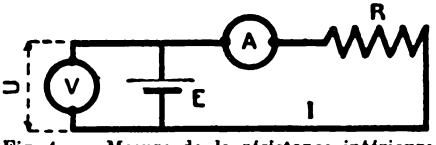


Fig. 1. — Mesure de la résistance intérieure de l'élément de pile E.

Une méthode de laboratoire, dite d'opposition, que nous étudierons plus loin, donne le moyen de mesurer la f. é. m. sans que l'élément débite du courant.

2. — Mesure de la résistance intérieure.

1° Mesurons la f. é. m. E.

2° Faisons débiter à l'élément un courant I, mesuré avec un ampèremètre, dans une résistance extérieure R et mesurons avec un voltmètre la tension aux bornes correspondante U (fig. 1).

Des formules d'Ohm

$$E = (R + r)\,I \qquad \text{et} \qquad U = RI$$

nous tirons

$$r = \frac{E - U}{I}.$$

Il faut éviter que U soit très voisin de E, sinon l'erreur relative possible sur E — U est grande.

Puisque E — U = rI, pour que sa valeur soit notable, il faut un courant I relativement intense. Alors la pile se polarise, E diminue et *r* croît. Pour atténuer cet inconvénient, nous ne brancherons la pile sur la résistance et le voltmètre que *pendant les lectures que nous effectuerons rapidement.*

En somme, la méthode est imprécise parce que la grandeur à mesurer risque de varier pendant les lectures.

3. — Choix et montage des appareils.

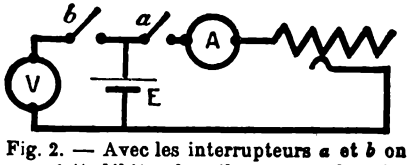


Fig. 2. — Avec les interrupteurs *a* et *b* on ne fait débiter la pile que pendant les lectures des appareils de mesure.

Soit à mesurer la résistance intérieure d'un élément Leclanché. Nous nous servons d'un voltmètre 0-3 volts, d'un ampèremètre avec shunt de 1 ampère et d'un rhéostat de 5 ohms, 1 ampère.

Les appareils sont montés comme l'indique la figure 2. Les interrup-

teurs *a* et *b* servent à fermer les circuits pendant la durée des lectures.

4. — Lectures et résultats.

Nous les consignerons dans un tableau du modèle suivant :

MESURE DE LA RÉSISTANCE INTÉRIEURE D'UN ÉLÉMENT.....
Voltmètre n°.....
Ampèremètre n°.....

VALEUR	LECTURES		CALCULS		
de E	Ampèremètre 100 div. sh.: 1A	Voltmètre 150 div. cali. : 3V	I	U	$r = \frac{E-U}{I}$
1	2	3	4	5	6

Moyenne des résultats :

5. — Modification de la méthode précédente dans le cas d'un élément à faible débit et grande résistance intérieure.

Elle tient compte du débit de l'élément dans le voltmètre.

Il faut disposer de deux voltmètres de même résistance R (fig. 3) ou d'un seul voltmètre de résistance R et d'une résistance égale R.

1° On branche un seul voltmètre ; l'élément débite dans l'appareil de résistance R, on mesure la tension U_1 aux bornes.

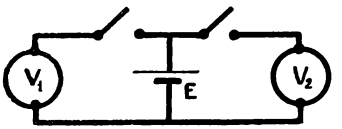


Fig. 3. — Mesure de la résistance intérieure de l'élément E avec deux voltmètres.

2° On ajoute le second voltmètre ou la résistance R en dérivation sur l'élément qui débite alors dans une résistance totale R : 2, on mesure la tension U_2 correspondante.

En appliquant la loi d'Ohm à la première mesure :

$$E = (R + r)\, I_1 \qquad U_1 = RI_1$$

puis à la seconde :

$$E = \left(\frac{R}{2} + r\right) I_2 \qquad U_2 = \frac{RI_2}{2}$$

On obtient quatre équations dans lesquelles on élimine les inconnues E, I_1, I_2, on trouve :

$$r = R\,\frac{U_1 - U_2}{2U_2 - U_1}.$$

Applications.

A. — Mesure de la f. é. m. et de la résistance intérieure

des différents modèles d'éléments de pile que possède le laboratoire;
d'une pile sèche de lampe de poche;
d'une batterie d'accumulateurs de laboratoire;
d'un élément Daniell, étalon de f. é. m.

B. — Étude de la polarisation et de la dépolarisation d'un élément Leclanché.

Le montage de la figure 2 convient à cette étude sans modifications.
Le rhéostat est réglé une fois pour toutes pour obtenir un débit normal de l'élément.

1° On maintient l'interrupteur *a* fermé pendant 5 minutes. Au bout de ce temps, l'interrupteur toujours fermé, on mesure l'intensité débitée I_1, la tension aux bornes U_1. Puis on ouvre un instant *a* et l'on mesure la f. é. m. de l'élément E_1.

2° L'interrupteur *a* est refermé pendant 5 minutes, puis on mesure de même I_2, U_2, E_2.

3° On continue ainsi de 5 en 5 minutes pour obtenir 10 séries de lectures.

Résultats et calculs sont consignés dans un tableau du modèle suivant :

POLARISATION D'UN ÉLÉMENT LECLANCHÉ.
Ampèremètre n° .....
Voltmètre n° .....

	LECTURES			CALCULS			
N° des mesures	Ampèremètre 100 divisions shunt : 1 A	Voltmètre 150 divisions, calibre 3V		I	U	E	$r = \frac{E-U}{I}$
		a fermé	*a* ouvert				
1	2	3	4	5	6	7	8

On tracera sur du papier millimétrique les courbes de E et de *r* en fonction du temps.

En laissant reposer l'élément sans qu'il fournisse de courant et en mesurant toutes les 5 minutes sa f. é. m., on étudiera sa *dépolarisation*. On tracera la courbe de E en fonction du temps.

Matériel nécessaire à la manipulation.

Une boîte de contrôle à cadre mobile et aimant fixe.
Un rhéostat 10 Ω, 2 A.

Note sur les étalons de force électromotrice.

1. — L'étalon légal de force électromotrice est l'élément de pile Weston.

L'étalon de f. é. m. a été fixé par le décret du 26 juillet 1919 dans le paragraphe suivant :

« Le volt est légalement représenté par le volt international... dont la valeur peut être considérée comme égale à la fraction $\frac{1}{1{,}01830}$ *de la f. é. m., prise à la température de 20°, de la pile Weston au sulfate de cadmium*[1]. »

L'élément Weston est représenté par la figure 4. Sa constitution est la suivante :

Électrolyte excitateur : solution saturée de sulfate de cadmium (SO^4Cd);

Électrode négative : amalgame de cadmium à 12,5 % de cadmium;

Électrode positive : mercure;

Dépolarisant : pâte de sulfate mercureux (SO^4Hg^2).

Quand il fonctionne, du cadmium se substitue au mercure du sulfate mercureux. Il n'y a pas production d'hydrogène et l'élément peut être fermé hermétiquement.

Sa f. é. m., à 20°, est 1,018 30 volt, à 1 : 100 000 près. A une autre température T°, cette f. é. m. devient :

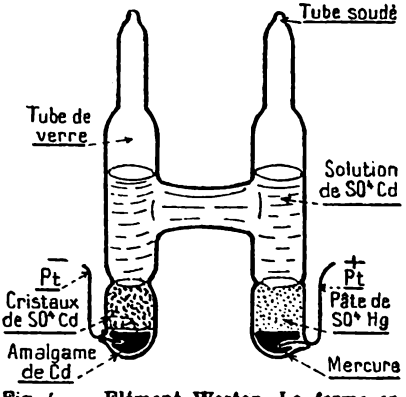


Fig. 4. — Elément Weston. La forme en H évite le mélange des constituants au cours du transport de l'appareil. Les tubes ont 7 cm de haut et 1,2 cm de diamètre.

$$E_T = 1{,}018\ 30 - 0{,}000\ 040\ 6.\ (T - 20)\ \textit{volt.}$$

La résistance intérieure de l'élément représenté par la figure 5 atteint 900 ohms.

A cause de cette grande résistance et aussi pour éviter la polarisation, il ne faut pas faire débiter à l'élément plus de 0,000 1 A. Le plus souvent

1. Le cadmium est un métal analogue au zinc. Il est mou et malléable. On l'emploie dans la fabrication des accumulateurs cadmium-nickel. L'oxyde et le sulfure de cadmium servent à faire des peintures jaunes.

même, on le monte en opposition avec une autre tension et l'on s'arrange pour qu'il n'ait aucun courant à fournir.

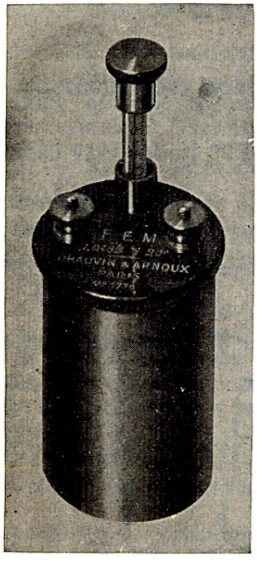


Fig. 5. — Pour le protéger, on loge l'élément Weston dans une boîte cylindrique en laiton. Un thermomètre donne la température de l'élément.

2. — La pile Daniell suffit comme étalon pour les mesures industrielles.

Elle est décrite dans le cours d'électricité[1]. Tout électricien peut la construire facilement à peu de frais, tandis que l'élément Weston coûte cher.

Pour que sa f. é. m. soit 1,07 volt, à 0,01 près, on la fabrique avec des *produits purs :*

Électrolyte excitateur : solution de sulfate de zinc pur (SO^4 Zn, 7 H^2O), de densité 1,40, soit 56 grammes de sel pour 100 grammes de solution;

Electrode négative : bâton de zinc amalgamé.

Electrode positive : plaque de cuivre électrolytique.

Dépolarisant : solution de sulfate de cuivre pur (SO^4Cu, $5H^2O$), de densité 1,10, soit 16 grammes de sel pour 100 grammes de solution.

Au cours d'une série de mesures, pour que la f. é. m. ne change pas sensiblement, la pile ne doit pas débiter plus de 0,01 ampère.

Quand une pile étalon a fourni par accident un courant trop intense il faut la laisser se reposer plusieurs heures. Pour des mesures soignées, il est bon de disposer de deux éléments étalons : l'un sert pour le réglage des appareils, on le remplace par le second pour les mesures finales.

1. *Électricité industrielle*, 1re partie, 24e leçon. Il est intéressant de comparer la constitution de l'élément Weston et celle de l'élément Daniell.

Consommation d'une lampe à incandescence. Éclairement en fonction de la tension.

1. — Principe des mesures, choix et disposition des appareils.

La lampe étudiée est une lampe dite demi-watt, 110 volts, 100 watts, alimentée par du courant continu. Il s'agit de déterminer, en faisant varier la tension à ses bornes.

1° la puissance qu'elle consomme;

2° l'éclairement qu'elle produit en un point déterminé.

a) Mesure de la puissance.

Nous mesurons la tension aux bornes U, l'intensité absorbée I. La puissance consommée est $P = UI$ watts.

Sont nécessaires un voltmètre 0-150 volts et un ampèremètre avec shunt de 1 ampère. Le voltmètre doit être monté en amont puisque la résistance de la lampe est de l'ordre d'une centaine d'ohms.

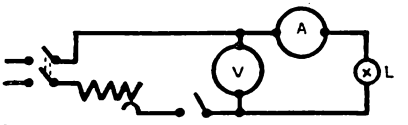


Fig. 1. — Mesure de la puissance consommée par la lampe L.

Un rhéostat d'une quarantaine d'ohms est en série dans le circuit : il permet de faire varier la tension aux bornes de la lampe.

b) Mesure de l'éclairement.

Rappelons que l'éclairement s'évalue en ***lux***. Un lux est l'éclairement produit par une source lumineuse d'intensité 1 bougie décimale, sur une surface placée à 1 mètre de la source, normalement au rayon lumineux.

L'appareil le plus commode pour mesurer des éclairements est un luxmètre à cellule photo-électrique[1].

Les deux électrodes de cette cellule sont connectées aux bornes d'un galvanomètre portatif très sensible (le courant produit dans le galva-

1. Voir 42e leçon, *Électricité industrielle*, 3e partie.

nomètre par la cellule éclairée est de l'ordre du microampère). Le galvanomètre, gradué en lux, possède deux ou trois sensibilités, l'une de 0 à 100 lux, les autres de 0 à 500 et de 0 à 1 000.

La lampe est supportée par une potence à 1 *mètre* au-dessus de la cellule.

Elle est la seule allumée dans le laboratoire, dont les fenêtres sont fermées par des rideaux noirs qui arrêtent la lumière du dehors.

2. — Lectures.

Faire croître graduellement la tension aux bornes de la lampe depuis 80 jusqu'à 115 volts, en relevant pour une dizaine de valeurs U, I et l'éclairement E.

Ces lectures seront consignées dans le tableau suivant :

CONSOMMATION ET ÉCLAIREMENT D'UNE LAMPE
100 W, 110 V, FABRICATION.....
Voltmètre n° .....
Ampèremètre n° .....

LECTURES			CALCULS				
Voltmètre 150 divisions calibre 150 V	Ampèremètre 100 divisions shunt : 1 A	Luxmètre sensibilité 0-500 Lux	U	I	P = UI	E	Consom. par lux $\frac{P}{E}$
1	2	3	4	5	6	7	8

Pour déterminer les valeurs de U et de I, on tiendra compte, en plus des lectures faites aux appareils de mesure, des corrections d'étalonnage.

3. — Conclusions.

On tracera sur du papier millimétrique les courbes suivantes :
1° Courbe de la *puissance* consommée en fonction de U.
2° Courbe de l'*éclairement* en fonction de U.
3° Courbe de la *consommation par lux* en fonction de U.
Que conclure après examen de ces courbes ?

Autres mesures à faire au luxmètre.

Nous en signalons deux, dont la première est d'un grand intérêt pratique.

A. — Éclairement d'une salle de classe ou de dessin.

Faire, à l'échelle, le plan de l'une des salles de classe ou de dessin de l'École, en y figurant les tables et en indiquant les places de chaque élève.

Au cours d'une soirée obscure, éclairer normalement la salle et mesurer l'éclairement à chaque place d'élève.

La cellule photoélectrique sera placée à plat sur la table, comme un livre ou un cahier. Parce que la présence de l'observateur, en arrêtant des rayons directs ou diffusés, peut modifier l'éclairement, l'observateur aura soin de s'asseoir à chaque place repérée pour y effectuer la mesure.

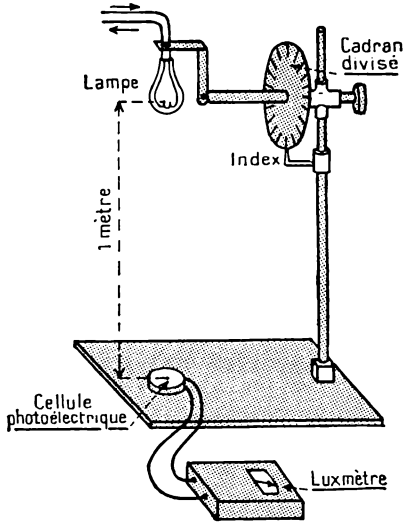


Fig. 2. — Mesure de l'éclairement produit par une lampe.
L'éclairement en *lux*, au voisinage immédiat de la cellule photo-électrique, est donné par simple lecture au *luxmètre*.

B. — Intensité lumineuse d'une lampe dans diverses directions.

Soient I l'intensité lumineuse d'une source en bougies décimales, E l'éclairement en lux d'un écran normal au rayon lumineux, *d* la distance en mètres de l'écran à la lampe.

L'éclairement est proportionnel à l'intensité de la source et *inversement proportionnel au carré de la distance de l'écran à la source :*

$$E = I : d^2$$

lux bougies mètres.

Dans le cas où $d = 1$ mètre, E et I sont exprimés par le même nombre.

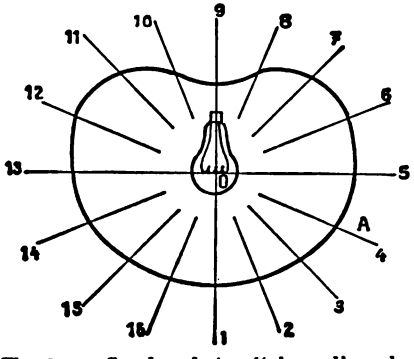


Fig. 3. — Courbe photométrique d'une lampe.

Proposons-nous de mesurer l'intensité lumineuse d'une lampe, suivant diverses directions, dans un plan vertical passant par le filament lumineux.

Dispositif expérimental. La lampe est montée à l'extrémité d'une équerre en fer plat, de manière que le filament soit dans l'axe d'une tige cylindrique horizontale, maintenue dans une noix sur un support vertical de 1 mètre de hauteur.

Un cercle en carton, divisé en 16 parties égales, est fixé sur la tige horizontale pour repérer les directions quand on fait tourner la lampe dans un plan vertical (fig. 2).

La cellule du luxmètre est disposée à l'aplomb de la lampe.

Lectures et courbe photométrique. On mesure et on note l'éclairement pour chacune des directions tracées sur le cercle de carton.

Pour obtenir la courbe photométrique de la lampe, on trace autour d'un point O les 16 directions suivant lesquelles les mesures ont été effectuées. On donne à chaque rayon, tel que OA, une longueur proportionnelle à l'intensité lumineuse dans sa direction. On joint ces points par une courbe régulière (fig. 3).

On peut imaginer un dispositif expérimental analogue pour obtenir la courbe photométrique de la lampe munie d'un diffuseur.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Une boîte de contrôle pour courant continu.
Un luxmètre photoélectrique.
Un rhéostat 40 Ω, 2 A.

Mise en station et réglage d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

1. — Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval est un instrument de laboratoire très fragile.

Cet appareil a été étudié dans une leçon du cours d'électricité [1]. Il est délicat, à cause surtout de la fragilité des fils d'argent qui supportent le cadre mobile.

Pour transporter le galvanomètre d'un endroit à l'autre dans la salle de mesures, vous aurez toujours soin de détendre le fil de suspension, afin que le cadre repose sur le cylindre creux de fer qui lui sert de noyau.

Quand l'appareil sera en service, vous prendrez les précautions nécessaires pour qu'il ne soit traversé que par des courants faibles de l'ordre de 0,000 1 ampère au maximum.

2. — Apprenez à régler un galvanomètre.

Placez-le sur un support solide, stable, et non sur une table ordinaire du laboratoire, pour éviter que des trépidations ne fassent osciller constamment le spot et ne gênent ainsi les lectures.

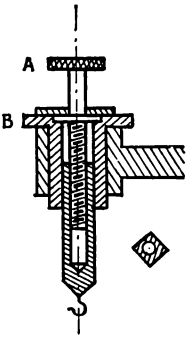


Fig. 1. — Tête de suspension du cadre d'un galvanomètre. La vis A sert à monter et à descendre le cadre, le tambour B à l'orienter.

Relevez ensuite le cadre en tournant la vis supérieure de suspension (fig. 1) jusqu'à ce que ses côtés horizontaux soient à peu près équidistants du noyau; puis, tendez très légèrement les fils d'argent en manœuvrant la vis inférieure.

Il faut alors agir sur les vis calantes du socle du galvanomètre, pour que le cadre puisse osciller librement, c'est-à-dire sans frotter contre les pièces polaires des aimants, ni contre le noyau central. Pour vous assurer que le cadre n'est gêné en rien, soufflez légère-

[1] Voir 46e leçon, *Électricité industrielle, Lois générales.*

ment sur l'un de ses côtés verticaux afin de le mettre en mouvement.

Enfin, en tournant le tambour de la suspension supérieure, placez le cadre dans le plan nord-sud des aimants.

3. — Réglez l'échelle translucide.

Sur le cadre mobile du galvanomètre est collé un petit miroir concave, dont le rayon de courbure est en général voisin de 1 mètre. Si donc on met un petit objet lumineux à 1 mètre du miroir, on en obtient une image réelle à la même distance (fig. 2).

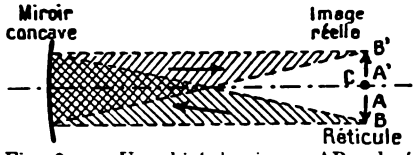


Fig. 2. — Un objet lumineux AB, placé au voisinage du centre de courbure C d'un miroir sphérique concave, donne une image A'B' symétrique de AB par rapport au centre du miroir. Les flèches indiquent la marche des rayons lumineux.

C'est près du centre de courbure du miroir que l'on place le milieu de la règle translucide qui sert à mesurer la rotation du cadre. Sous cette règle se trouve une fenêtre traversée par un fil noir vertical (réticule) et éclairée par une glace plane, mobile autour de deux axes perpendiculaires. Tournez cette glace pour envoyer sur le miroir du galvanomètre un faisceau lumineux provenant d'une lampe à incandescence placée latéralement à quelque distance et, en tâtonnant, réglez la position de la règle pour obtenir une image très nette du réticule sur le zéro de l'échelle (fig. 3).

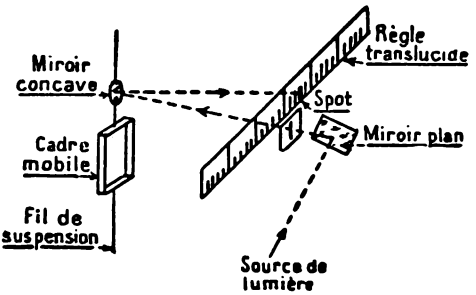


Fig. 3. — Marche des rayons lumineux formant le spot d'un galvanomètre.
Distance de la règle au miroir concave : 1 mètre le plus souvent.

Le réglage d'un galvanomètre est une opération longue et délicate. Il est supprimé dans certains appareils modernes (fig. 4). Tous les organes, cadre mobile, aimant, échelle translucide, dispositif d'éclairage sont logés dans un boîtier. Il suffit de décaler le cadre, d'amener le spot sur le zéro de l'échelle et l'appareil est prêt à servir.

4. — Comment mesure-t-on la rotation du cadre ?

Quand le cadre oscille, le spot[1] se déplace sur la règle. Vous savez que

1. Mot d'origine anglaise qui désigne la tache lumineuse formée sur l'échelle translucide

le rayon réfléchi MF tourne d'un angle 2α quand le miroir tourne de l'angle α (fig. 5).

On n'évalue pas l'angle 2α en unités d'angles, degrés ou grades. *On le mesure par la longueur OF, exprimée en millimètres*, du déplacement du spot sur l'échelle à partir du zéro (fig. 5).

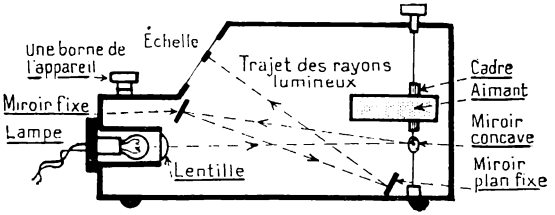


Fig. 4. — Coupe schématique d'un galvanomètre moderne, portatif, à index lumineux. Le boîtier mesure : 260 × 200 × 105.
Suivez la marche d'un rayon de lumière qui part de la lampe et rencontre le miroir concave du galvanomètre.

Lorsque la rotation α du miroir passe de 0°5 à 5°, 2α passe de 1° à 10°. Le déplacement du spot qui était OF = 1 000 tg 1° = 17,5 *mm* devient OF' = 1 000 tg 10° = 176,3 *mm*. Il est donc, non pas 10 fois plus grand, mais 176,3 : 17,5 = 10,08 fois plus grand. L'expérimentateur, qui en conclut que la rotation du miroir n'est pas devenue 10 fois, mais 10,08 fois plus grande, commet une *erreur par excès*. L'*erreur relative* correspondante est $\frac{10{,}08 - 10}{10}$ = 0,008, inférieure à 0,01; elle est négligeable. Donc :

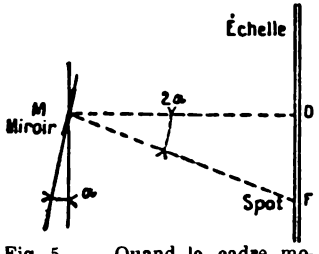


Fig. 5. — Quand le cadre mobile tourne de l'angle α, le rayon lumineux réfléchi tourne de 2α.

a) tant que les déplacements du spot ne dépassent pas 175 *mm*, ils sont pratiquement proportionnels aux rotations du cadre mobile et peuvent servir à les mesurer;

b) comme les petites rotations du cadre sont proportionnelles aux courants qui passent dans le galvanomètre, on mesure également ces intensités par le déplacement du spot.

5. — Évaluez approximativement la sensibilité du galvanomètre.

On caractérise la sensibilité d'un galvanomètre par l'intensité du courant nécessaire pour déplacer le spot de 1 millimètre sur l'échelle placée à 1 mètre du miroir [1]. Plus cette intensité est faible, plus le galvanomètre est sensible.

par le faisceau de lumière réfléchi par le miroir. Cette tache est coupée par un trait non vertical, fin, qui est l'image du réticule, c'est la position de ce trait qui fixe la position du spot.

1. Comparez avec la sensibilité d'une balance.

Pour déterminer cette intensité, vous vous servirez d'un élément de pile Daniell comme étalon de f. é. m. (E = 1,07 *V*).

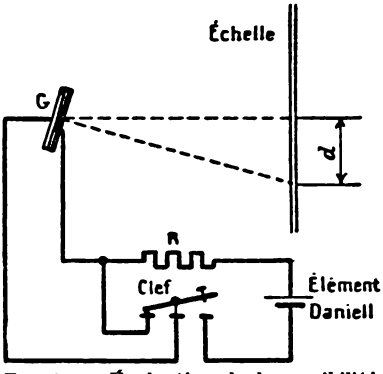


FIG. 6. — Évaluation de la sensibilité d'un galvanomètre.
Grâce à la clef, le cadre galvanométrique bien en circuit avec l'élément de pile, ou bien fermé sur lui-même.

Mettez en série avec l'élément une grande résistance, R = 100 000 ohms. Montez l'ensemble aux bornes du galvanomètre avec un interrupteur genre manipulateur Morse (fig. 6). Mesurez le déplacement *d* du spot.

Donnez à R les valeurs successives 90 000, 70 000, 50 000, ... 20 000 ohms et mesurez les valeurs de *d* correspondantes.

Calculez dans chaque cas le courant *i* dans le galvanomètre et la sensibilité $s = i : d$.

Lectures et calculs sont notés dans un tableau analogue au suivant :

SENSIBILITÉ DU GALVANOMÈTRE N° ...

	LECTURES		CALCULS	
E 1	R 2	*d* 3	$i = E : R$ 4	$s = i : d$ 5
1,07 V	100 000 Ω	30 mm	$1{,}07 \cdot 10^{-4}$ A	$0{,}357 \cdot 10^{-4}$
	90 000	33	$1{,}19 \cdot 10^{-4}$	$0{,}357 \cdot 10^{-4}$
	70 000	43	$1{,}53 \cdot 10^{-4}$	$0{,}357 \cdot 10^{-4}$
	50 000	60	$2{,}14 \cdot 10^{-5}$	$0{,}358 \cdot 10^{-4}$
	30 000	100	$3{,}57 \cdot 10^{-4}$	$0{,}358 \cdot 10^{-4}$
	20 000	151	$5{,}4 \cdot 10^{-4}$	$0{,}357 \cdot 10^{-4}$

Dans le calcul de *i* nous négligeons la résistance du galvanomètre et la résistance intérieure de la pile qui sont faibles [1] par rapport à R.

D'ailleurs, il serait illusoire de chercher pour *i* et pour *s* des valeurs précises, car la sensibilité change à chaque mise en station du galvanomètre, parce que les fils de suspension du cadre sont plus ou moins tendus et parce que l'échelle translucide n'est pas toujours rigoureusement à la

1. L'erreur absolue commise est inférieure à 200 Ω avec le galvanomètre employé et l'erreur relative inférieure à 0,01 dans le cas où R > 20 000 Ω.

même distance du cadre, autrement dit parce que la *fidélité* d'un galvanomètre disparaît dès qu'on modifie le réglage de l'appareil.

6. — Mesurez la résistance G du galvanomètre.

Réglez la résistance de protection R de manière à obtenir pour le déplacement *d* du spot, quand le galvanomètre n'est pas shunté, une valeur voisine de 175 *mm*.

Placez, entre les bornes du galvanomètre, une boîte de résistances étalonnées pour shunter l'appareil par une résistance connue S *ohms* (fig. 7). Le déplacement du spot diminue et devient *d'*.

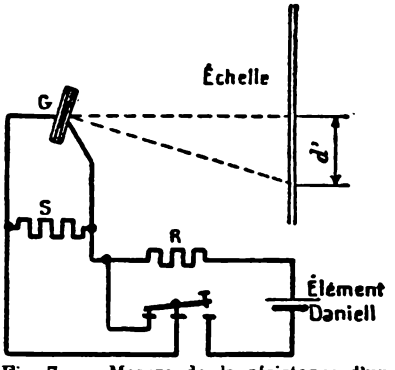


Fig. 7. — Mesure de la résistance d'un galvanomètre.

Le courant total dans R est encore mesuré par *d*, car, en raison de la grande valeur de R, l'introduction du shunt n'a augmenté ce courant que d'une quantité négligeable. Il se partage dans les résistances dérivées G et S, en *d'* dans G et *d*-*d'* dans S. Ces intensités sont inversement proportionnelles aux résistances :

$$\frac{d - d'}{d'} = \frac{G}{S} \qquad \text{donc} \qquad G = \frac{d - d'}{d'} S \qquad (1)$$

Vous inscrirez dans un tableau du modèle qui suit les lectures faites pour quatre valeurs de S et les calculs déterminant G.

RÉSISTANCE DU GALVANOMÈTRE N° ...

LECTURES			CALCULS
SANS SHUNT	AVEC SHUNT		
Déplacement *d* du spot 1	Résistance S du shunt 2	Déplacement *d'* du spot 3	$G = \frac{d - d'}{d'} S$ 4
150 mm	1 000 Ω	127 mm	181 Ω
	500	110	182
	200	79	180
	150	68	182

Moyenne des résultats : G = 181 Ω.

Vérification. — Remarquez que pour S = G, la formule (1) montre que $d' = d : 2$.

Vous vérifierez donc la valeur trouvée pour G en donnant cette valeur au shunt et en constatant que le déplacement du spot est alors réduit à la moitié du déplacement quand le galvanomètre n'est pas shunté.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval.
Une résistance de 100 000 ohms divisée en dizaines de mille.
Une boîte de résistances à fiches de 1 000 ohms.
Un élément Daniell.

Amortissement et résistance critique d'un galvanomètre à cadre mobile.

Nous nous proposons d'étudier expérimentalement :
1° le mouvement d'oscillation du cadre d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval ;
2° le shuntage de l'appareil.

1. — Oscillations quand le circuit du cadre est ouvert.

Le dispositif expérimental est celui de la figure 1. En P est un élément Daniell, en R une résistance de protection de 100 000 ohms.

Fermons l'interrupteur A. Le spot se déplace jusqu'à la division *d*. Quand il est immobile, ouvrons l'interrupteur A. Le cadre oscille.

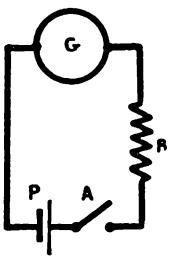


Fig. 1. — Montage du galvanomètre avec une résistance de protection.

1° Mesurons la durée d'une oscillation double.

Le moyen le plus simple, mais qui n'est pas le plus précis, consiste à mesurer avec un compte-secondes ou une montre donnant la seconde la durée de 40 ou 50 oscillations doubles que l'on peut compter :

$$T_1 = \ldots\ldots$$

Après avoir laissé osciller le cadre pendant quelque temps, recommençons la mesure :

$$T_2 = \ldots\ldots$$

Comparons T_1 et T_2 : pouvons-nous conclure que les oscillations sont isochrones ?

2° Mesurons les amplitudes de plusieurs oscillations doubles successives.

Notons d'abord ces amplitudes pour les 5 premières oscillations après la mise en mouvement du cadre.

Puis, mesurons les amplitudes des 21e, 22e,... 25e oscillations.

Elles ont diminué. La figure 2 résulte de ces observations.

Donc *le mouvement du cadre à circuit ouvert est un mouvement pendulaire un peu amorti.* Ce faible amortissement est produit par le frottement de l'air dans lequel le cadre se déplace.

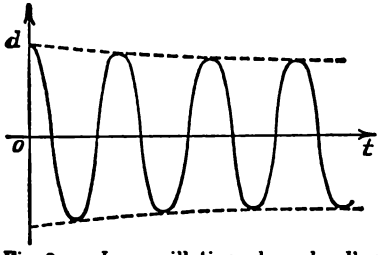


Fig. 2. — Les oscillations du cadre d'un galvanomètre sont isochrones. Elles sont peu amorties quand le circuit du cadre est ouvert.

2. — Oscillations du cadre quand son circuit est fermé.

Le dispositif expérimental est celui de la figure 3. Le galvanomètre est shunté par une résistance *r* prise dans une boîte de résistances à fiches de 5 000 ohms.

1° ***Donnons à r une grande valeur***, par exemple 2 000 ohms, et recommençons les mesures du paragraphe précédent.

Nous trouvons :

a) pour la période des oscillations

$$T_3 = \ldots\ldots, \quad T_4 = \ldots\ldots$$

les oscillations restent isochrones; leur période est un peu plus grande qu'à circuit ouvert.

b) pour l'amplitude de ces oscillations, elle va en décroissant plus rapidement qu'à circuit ouvert (fig. 4).

L'amortissement du mouvement du cadre est accru à cause des courants induits dans le circuit par le déplacement des conducteurs verticaux du cadre dans le champ magnétique de l'aimant.

2° ***Donnons à r une valeur plus faible***, par exemple 500 ohms.

Recommençons les mesures de T et de *d* :

a) la période augmente;

b) les amplitudes successives diminuent rapidement.

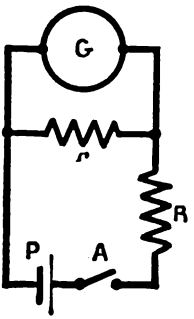


Fig. 3. — Shuntage du galvanomètre. *R* est une résistance de protection; *r* est la résistance du shunt.

3. — Cherchons la plus grande valeur de la résistance *r* pour laquelle les oscillations sont supprimées.

Les résultats précédents nous font supposer qu'en diminuant progressivement la résistance *r* nous trouverons une valeur pour laquelle le cadre, écarté de sa position d'équilibre, y revient et s'y arrête sans osciller.

Cherchons cette valeur par tâtonnements.

La plus grande résistance du circuit, qui produit un amortissement juste suffisant pour que le mouvement du cadre soit *apériodique*, se nomme

résistance critique du galvanomètre. Elle est la somme de la résistance r_c du shunt et de la résistance G du cadre :

$$R_c = r_c + G.$$

On dit que cette valeur réalise l'*amortissement critique*.

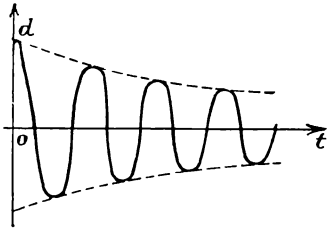


Fig. 4. — Quand le galvanomètre est shunté, les oscillations du cadre sont fort amorties.

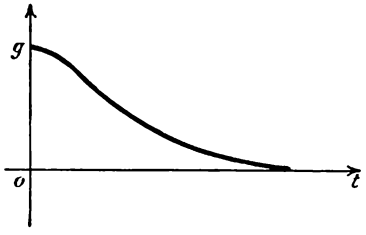


Fig. 5. — Le cadre du galvanomètre n'oscille pas quand la résistance qui le shunte est faible.

Pour l'appareil étudié : $r_c \simeq 70$ ohms et $R_c \simeq 250$ ohms.

4. — Que se passe-t-il si la résistance du circuit est plus faible que la résistance critique ?

Fermons sur lui-même le galvanomètre en mouvement. Il revient lentement au zéro, comme si le cadre se déplaçait dans un milieu visqueux.

5. Plus la résistance qui shunte le cadre et amortit son mouvement est faible, plus la sensibilité du galvanomètre est réduite.

Donnons à la résistance r du shunt différentes valeurs, entre autres celle qui produit l'amortissement critique et mesurons la déviation correspondante du cadre. Les résultats seront consignés dans un tableau comme le suivant :

SHUNTAGE DU GALVANOMÈTRE N° ...

E 1	Résistance de protection 2	Résistance du shunt 3	Déplacement du spot 4
1,07 V	R = 20 000 Ω	5 000 Ω	144 *mm*
		3 000	137
		500	110
.....	.....	.....	.....
		$r^o = 70$	42

Ils montrent que la sensibilité décroît quand la résistance du shunt diminue.

Pour que le galvanomètre n'oscille pas et possède dans ces conditions la sensibilité maximum, on donne à r la valeur r_c produisant l'amortissement critique.

6. Calcul de l'intensité dans le cadre du galvanomètre shunté.

Soient G la résistance du cadre, s celle du shunt, R la résistance de protection et E la f. é. m. de la pile dans le circuit.

La résistance R′ équivalente aux résistances G et s qui sont en parallèle est telle que

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{G} + \frac{1}{s} \qquad \text{d'où} \qquad R' = \frac{Gs}{G + s}$$

La résistance totale du circuit, en négligeant la résistance intérieure de la pile, a pour valeur

$$R + R' = R + \frac{Gs}{G + s} = \frac{R\,(G + s) + Gs}{G + s}$$

Le courant débité par la pile est donc

$$I = E \times \frac{G + s}{R\,(G + s) + G\,s}.$$

La partie qui passe dans le cadre

$$i = I \times \frac{s}{G + s}$$

ou

$$i = E\,\frac{s}{R\,(G + s) + G\,s}$$

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval.
Une résistance de 20 000 ohms.
Une boîte de résistances à fiches de 5 000 ohms.
Un élément Daniell.

Transformation d'un galvanomètre en voltmètre ou en ampèremètre.

I. — Montage en voltmètre.

1. — Dispositif expérimental.

Entre les deux points dont on veut mesurer la différence de tension, on monte, en dérivation, le galvanomètre avec shunt et résistance de protection (fig. 1).

1° En plus de son rôle de protection, la résistance R de plusieurs milliers d'ohms, en réduisant le courant pris par l'appareil de mesure à une valeur très petite, permet de brancher l'instrument en dérivation sur une portion de circuit sans modifier de façon appréciable la tension préexistante qu'il s'agit de mesurer.

2° La résistance *s* qui shunte le galvanomètre ferme en permanence le circuit du cadre et en amortit les oscillations. De plus, elle contribue, comme la résistance R, à déterminer la sensibilité de l'appareil.

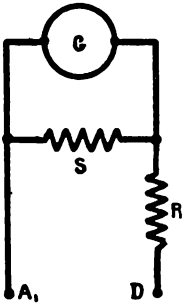


Fig. 1. — Le galvanomètre G est monté en voltmètre pour mesurer la tension entre les points A et D.

On peut effectuer le montage en employant pour R une boîte de résistances à fiches de 16 bobines, avec laquelle on réalise toute résistance d'un nombre entier d'ohms jusqu'à 11 110 ohms et pour *s* une boîte analogue de 10 bobines 410 ohms.

Il est aussi possible de se servir d'une boîte à pont (fig. 2). Le montage est alors représenté par la figure 3.

La résistance de protection est constituée par la branche DC_1 du pont. Le shunt *s* est fourni par les trois résistances de proportion AC.

Les points A_1 et D sont connectés aux deux points entre lesquels on veut mesurer la tension.

La clef de gauche de la boîte sert d'interrupteur.

On n'oubliera pas que les résistances à fiches ou celles de la boîte à pont ne peuvent supporter que les intensités suivantes :

Décade des milliers : 0,015 ampère.
— des centaines : 0,050 —
— des dizaines : 0,150 —
— des unités : 0,500 —

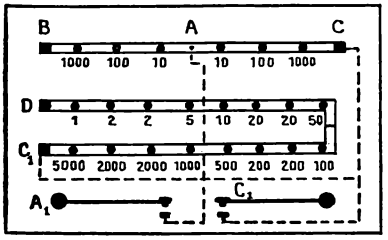


Fig. 2. — Schéma d'une boîte à pont. Les connexions en pointillé sont réalisées dans la boîte par le constructeur. Les résistances sont étalonnées à 0,002 près de leur valeur.

2. — Réglons et étalonnons l'appareil.

Proposons-nous d'obtenir que le spot dévie de 50 divisions quand une tension de 1 volt est appliquée entre les bornes D et A_1.

Mettons entre ces bornes un élément Daniell (E = 1,07 V) (fig. 3). Donnons à R une résistance de 10 000 ohms. Réglons ensuite par tâtonnements *s* et R pour que le spot dévie de 53,5 divisions quand nous appuyons sur la clef A_1.

Chaque millimètre de la règle transparente correspond alors à une tension de 0,02 volt entre D et A_1.

Ce résultat obtenu, on ne doit plus toucher au galvanomètre, ni aux résistances de la boîte, ni à l'échelle transparente, sinon l'étalonnage serait à recommencer.

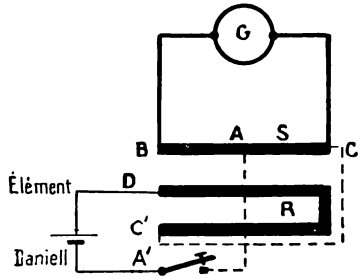


Fig. 3. — Montage du galvanomètre en voltmètre avec une boîte à pont. L'élément Daniell sert à étalonner l'appareil. (Lire A_1 au lieu de A' et *s* au lieu de S).

3. — Application : étalonnage d'un voltmètre, sensibilité 0-3 volts.

Nous réalisons le montage indiqué par la figure 4. Le voltmètre à étalonner est placé entre les bornes D et A_1. La tension entre ces bornes est fournie par un potentiomètre alimenté par une batterie d'accumulateurs de 4 volts.

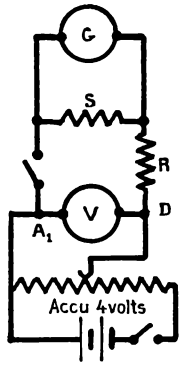


Fig. 4. — Étalonnage du voltmètre V.

Faisons varier cette tension et, pour différentes valeurs, lisons en même temps la déviation de l'aiguille du voltmètre et celle du spot du galvanomètre.

Le tableau des mesures est le suivant :

ÉTALONNAGE DU VOLTMÈTRE N° .....
Échelle : 150 divisions. Sensibilité : 0-3 volts.

LECTURES		CALCULS		
Déviation du voltmètre	Déviation du galvanomètre	Tension indiquée par le voltmètre	Tension indiquée par le galvanomètre	Corrections aux lectures sur le voltmètre
1		3	4	
18	19	18 × 0,02 = 0,36 V	19 × 0,02 = 0,38 V	+ 0,02 V
.....	.....	.....	.....	

Nous tracerons ensuite la courbe résumant les mesures sur du papier millimétrique en portant en abscisses les valeurs indiquées par le voltmètre et en ordonnées les corrections à effectuer à ces valeurs.

Remarques. — 1° L'erreur relative sur la mesure de la tension au galvanomètre est de l'ordre de 0,01.

2° La méthode d'étalonnage précédente peut être employée pour un voltmètre 0 — 15 volts en réglant la sensibilité du galvanomètre à 0,1 volt pour une division de l'échelle. Elle ne convient pas pour des tensions plus élevées.

II. — Montage en ampèremètre.

1. — Principe du montage.

Le galvanomètre est monté en voltmètre et réglé pour que sa sensibilité soit, par exemple, de 0,01 volt par division de l'échelle transparente.

Plaçons entre les bornes D et A_1 une résistance étalonnée X de 1 : I ohms (fig. 5). Quand cette résistance est traversée par un courant de I ampères, la tension entre ses bornes est 1 volt et le spot se déplace de 100 divisions. Chaque division correspond donc à une intensité de 0,01 I dans la résistance X. L'appareil est devenu un ampèremètre.

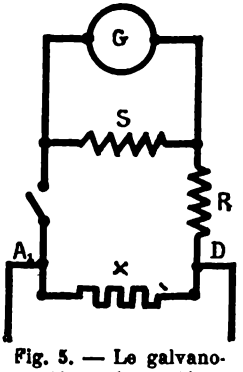


Fig. 5. — Le galvanomètre est monté en ampèremètre.

2. — Application : étalonnage d'un ampèremètre 0-10 ampères.

Nous choisissons pour X une résistance étalonnée de 0,1 ohm capable de supporter 10 ampères. Un déplacement du spot de 1 division mesure donc 0,1 ampère.

Montons en série avec X l'ampèremètre à contrôler, avec son shunt s'il y a lieu, puis un rhéostat de réglage 10 ohms, 10 ampères et une batterie de deux accumulateurs qui peut débiter 10 ampères (fig. 6).

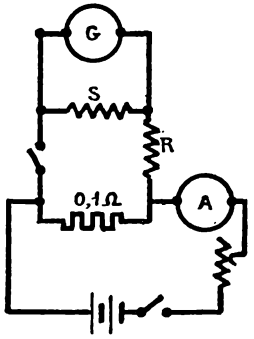


Fig. 6. — Étalonnage de l'ampèremètre A.

Lectures et calculs.

Pour une dizaine de positions de la manette du rhéostat, lisons simultanément la déviation de l'aiguille de l'ampèremètre et la position du spot du galvanomètre. Calculons ensuite les intensités indiquées par l'ampèremètre et celles mesurées par le galvanomètre.

Lectures et calculs seront consignés dans un tableau du modèle suivant :

ÉTALONNAGE DE L'AMPÈREMÈTRE n°.....
0-10 ampères — échelle de 100 divisions.

LECTURES		CALCULS		
Échelle de l'ampèremètre	Échelle du galvanomètre	Intensité indiquée par l'ampèremètre	Intensité indiquée par le galvanomètre	Corrections aux lectures sur l'ampèremètre
1	2	3	4	5
10	11	10 × 0,1 = 1 A	11 × 0,1 = 1,1 A	+ 0,1

Nous tracerons la courbe d'étalonnage en portant en abscisses les intensités données par l'ampèremètre et en ordonnées les corrections à y apporter.

Remarque. — Les procédés de mesure qui utilisent le déplacement du spot d'un galvanomètre manquent de précision. Le galvanomètre Deprez-d'Arsonval est surtout employé comme *appareil de zéro*, pour indiquer qu'aucun courant ne traverse la portion de circuit dans laquelle il est placé. Sa grande sensibilité est la qualité requise pour cet usage.

La *méthode potentiométrique* d'étalonnage des voltmètres et des ampèremètres, méthode de laboratoire générale et précise que nous apprendrons à employer, utilise le galvanomètre comme appareil de zéro (16e manipulation).

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Une boîte à pont.
Un potentiomètre 10 ohms, 1 ampère.
Une résistance étalonnée de 0,1 ohm capable de supporter 10 ampères.

Pyromètres thermo-électriques.

1. — Construisez un couple thermo-électrique.

A chacune des extrémités d'un fil de constantan [1], long de 1 mètre, de 1 millimètre de diamètre, soudez un fil de fer ayant les mêmes dimensions.

Pour réaliser cette soudure, tordez les deux fils ensemble sur une longueur de quelques millimètres et fondez l'extrémité de la torsade au chalumeau.

Serrez ensuite les deux fils de fer sous les bornes d'un galvanomètre sans résistance de protection ni shunt. Le circuit ainsi constitué est bien isolé sur des supports de verre ou de paraffine (fig. 1).

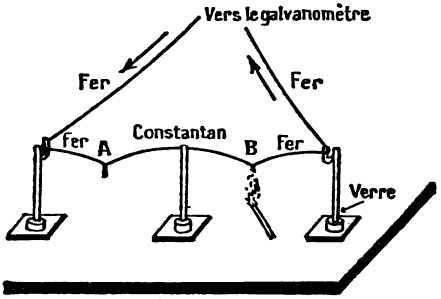


Fig. 1. — Le galvanomètre indique le passage d'un courant quand on chauffe la soudure B.

Chauffez l'une des soudures dans la flamme d'une allumette: le galvanomètre dévie; un courant passe dans le circuit, du constantan au fer à travers la soudure chaude.

Ce courant diminue d'intensité quand la soudure se refroidit; il cesse quand la température du circuit est redevenue uniforme.

Aucun courant ne se produit quand on chauffe soit le fil de constantan, soit le fil de fer, loin d'une soudure. Il n'y a pas non plus de courant quand on chauffe à la fois les deux soudures à la même température.

Donc ***la f. é. m. dans le circuit résulte de la différence de température des deux soudures.***

L'appareil transforme de l'énergie calorifique en énergie électrique : c'est une pile thermo-électrique. Mais cette transformation si facile s'effectue avec un très faible rendement et l'on n'a pas réussi à réaliser avec de telles piles une production notable d'énergie électrique.

A l'ensemble des deux fils soudés, fer et constantan, on donne le nom

1. Alliage de 60 % de nickel et 40 % de cuivre.

de couple thermo-électrique; le fer est l'électrode positive, le constantan, l'électrode négative.

2. — Étude du couple thermo-électrique fer-constantan.

Pour que les fils de fer ne puissent toucher le fil de constantan au voisinage des soudures, on les isole soit avec des perles de verre ou de stéatite, soit avec un tube de verre (fig. 2).

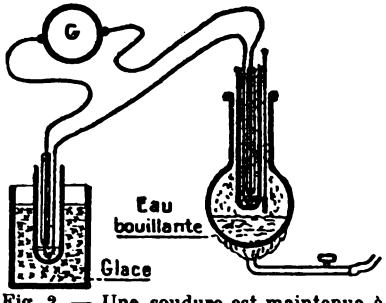


Fig. 2. — Une soudure est maintenue à 0°, l'autre est chauffée jusqu'à 100°.

Chaque soudure est mise dans un tube à essai contenant un peu d'huile. Un tube est placé dans un vase avec de la glace pilée et de l'eau, qui le maintiennent à 0°; l'autre est disposé dans un ballon avec de l'eau et un thermomètre (fig. 2).

Notez la déviation du galvanomètre et la température de l'eau pour diverses valeurs de celle-ci : 15°, 50°, 80°, 100°.

COUPLE THERMO-ÉLECTRIQUE FER-CONSTANTAN

Température de la soudure froide	Température de la soudure chaude	Déplacement du spot.
0°	.....	.....
	.....	.....

Construisez la courbe des températures en fonction du déplacement du spot (déplacements du spot en abscisses, températures en ordonnées).

L'appareil ainsi préparé peut servir à mesurer une température comprise entre 0° et 100°, par exemple le point de fusion de la naphtaline. Il suffit de plonger la soudure chaude dans de la naphtaline en cours de fusion, de lire la déviation du galvanomètre et de se reporter à la courbe d'étalonnage du couple. Vous trouvez 79°.

3. — F. é. m. produite par le couple fer-constantan.

Le courant dans le circuit fer-constantan-galvanomètre-fer dépend de la résistance du circuit. La f. é. m. est indépendante de cette résistance, pour des températures déterminées des soudures, elle est caractéristique du couple thermo-électrique.

La f. é. m. du couple fer-constantan est de l'ordre de 50 microvolts par degré de différence de température entre les deux soudures.

Des mesures précises montrent que cette f. é. m. n'est pas proportion-

nelle à cet écart de température. La soudure froide étant à 0°, la soudure chaude à T°, on peut représenter la f. é. m. e par une expression de la forme :

$$e = aT + bT^2 + cT^3$$

et déterminer a, b, et c par les mesures de e pour trois valeurs différentes de T.

4. — En pratique, un couple thermo-électrique ne comporte qu'une soudure.

Modifiez ainsi la constitution du couple : au lieu, pour l'une des soudures de souder directement le constantan et le fer, réunissez-les par un fil d'un troisième métal, de cuivre par exemple (fig. 3).

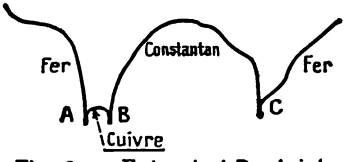


Fig. 3. — Entre A et B est intercalé un fil de cuivre.

Le fonctionnement du couple n'est pas modifié que la double jonction AB serve de soudure froide ou de soudure chaude, à condition que les deux points A et B soient toujours à la même température. Cette propriété, dite *loi des métaux intermédiaires*, s'énonce ainsi : *la f. é. m. d'un couple thermo-électrique n'est pas modifiée quand on intercale dans le circuit un ou plusieurs métaux intermédiaires, pourvu que la partie du circuit ainsi constituée soit maintenue à la même température.*

Il en résulte :

1° que l'on peut se servir de fils métalliques d'une autre nature que les constituants du couple pour la jonction au galvanomètre, de fils de cuivre par exemple ;

2° que l'on peut supprimer la soudure froide maintenue à 0°, du moins dans les mesures où une grande précision n'est pas requise. Le couple est alors constitué par deux brins fer et constantan soudés à une extrémité S, réunis aux autres extrémités par deux fils conducteurs au galvanomètre. C'est l'ensemble des jonctions S_1 et S_2 et du galvanomètre qui constitue la soudure froide (fig. 4).

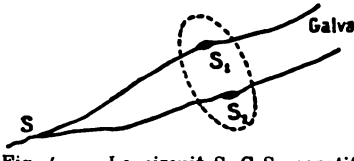


Fig. 4. — Le circuit S_1 G S_2 constitue la soudure froide.

Cette soudure est à la température ambiante et non à 0°. Divers procédés de compensation, que nous n'étudierons pas, corrigent automatiquement les indications du galvanomètre pour éliminer l'influence de la température de la soudure froide.

La figure 5 représente un couple usuel fer-constantan. Il est constitué par un tube de fer épais, de 13 ou 17 millimètres de diamètre extérieur, long de 1 à 2 mètres, dans l'axe duquel est placée une tige de constantan. Tube et tige sont soudés à une extrémité. A l'autre bout de l'appareil le tube de fer et la tige de constantan sont isolés électriquement et munis chacun d'une borne. C'est à ces bornes que l'on attache les cordons étalonnés de jonction avec le galvanomètre.

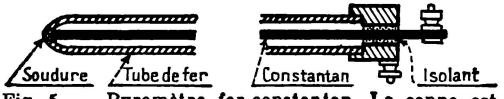


Fig. 5. — Pyromètre fer-constantan. La canne est longue de 1 à 2 mètres.

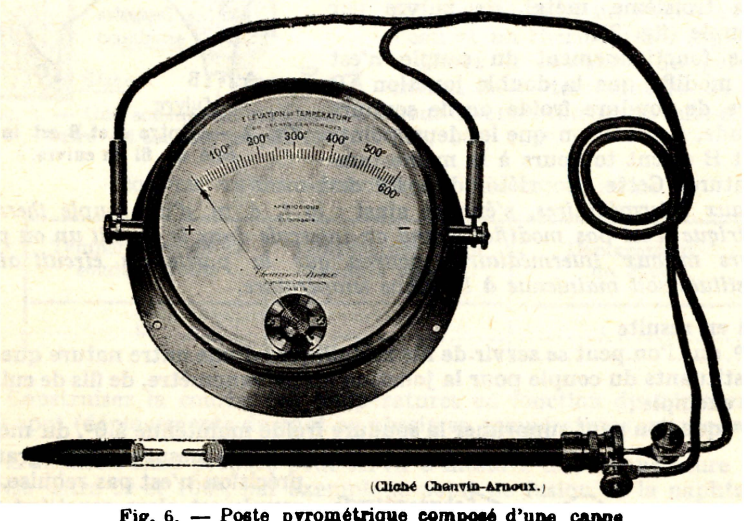


Fig. 6. — Poste pyrométrique composé d'une canne d'un galvanomètre à pivots et de cordons.

Ce galvanomètre est à pivots; il est gradué directement en température (fig. 6).

5. — On mesure des températures élevées avec des couples thermo-électriques.

Un couple thermo-électrique *cuivre-constantan* convient pour les températures inférieures à 400°.

Jusqu'à 700°, on emploie un couple *fer-constantan*.

Pour des températures atteignant 1 400°, on se sert d'un couple *chro-*

mel-alumel. Le chromel est un alliage de 90 % de nickel et 10 % de chrome, alors que l'alumel est fait de 97 % de nickel et 3 % d'aluminium.

Avec le couple Le Châtelier, on mesure jusqu'à 1 600°. Les électrodes sont l'une en *platine*, l'autre en *platine-rhodié*.

Les pyromètres thermo-électriques sont d'un usage fréquent dans certaines usines. Ils servent par exemple :

au contrôle des fours de traitement thermique des aciers et du duralumin, pour les opérations de trempe, de recuit;

à la surveillance des gazogènes, des fours de forge;

au contrôle de la surchauffe de la vapeur.

Il est probable que les ateliers de l'École en possèdent. Vous demanderez à les examiner et l'un de vos maîtres les mettra en service avec vous pour mesurer la température d'un four.

Matériel nécessaire à la manipulation.

Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval.
Un double couple fer-constantan.
Un couple avec cuivre intermédiaire.

Mesure d'une résistance avec une boîte à pont.

1. — Le montage en pont de Wheatstone.

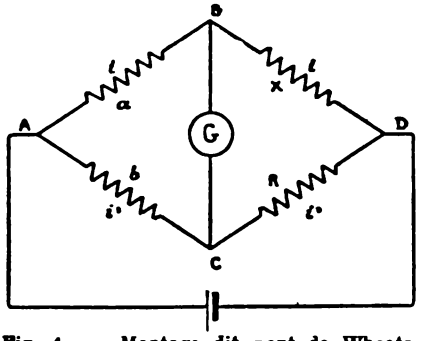


Fig. 1. — Montage dit pont de Wheatstone.

Il est représenté par le schéma de la figure 1.

On dit que *le pont est en équilibre quand le galvanomètre n'est traversé par aucun courant.*

Dans ce cas [1], les résistances des quatre branches du pont satisfont à la relation :

$$\frac{a}{x} = \frac{b}{R}.$$

Si a, b, R sont des résistances connues, x une résistance à mesurer, celle-ci peut être calculée :

$$x = \frac{a}{b} R.$$

a et b sont *les bras de proportion, R la résistance de réglage.*

2. — Il est possible de réaliser le montage avec trois boîtes de résistances étalonnées.

Deux boîtes de résistances à fiches de 1 110 ohms constituent les bras de proportion a et b.

La résistance de réglage R est une boîte de 16 résistances donnant au total 11 110 ohms. Les connexions entre ces boîtes sont effectuées en fil de cuivre, diamètre 2 millimètres, courtes, pour que leurs résistances soient négligeables.

Le galvanomètre Deprez-d'Arsonval est muni d'un shunt que l'on supprime quand le pont est presque en équilibre.

Comme source de courant, un petit accumulateur ou un élément Leclanché suffisent.

1. 50^e leçon, *Électricité industrielle, Lois générales.*

Deux interrupteurs genre manipulateurs Morse sont montés, l'un A_1 en série avec la pile, l'autre C_1 en série avec le galvanomètre (fig. 2). Il importe de toujours fermer l'interrupteur A_1 le premier, parce que la résistance X peut être inductive et produire, pendant l'établissement du courant, une f. é. m. de self capable de dévier le galvanomètre, alors que le pont est en équilibre en régime stable.

Rappelons que les résistances étalonnées ne peuvent supporter que des intensités très faibles.

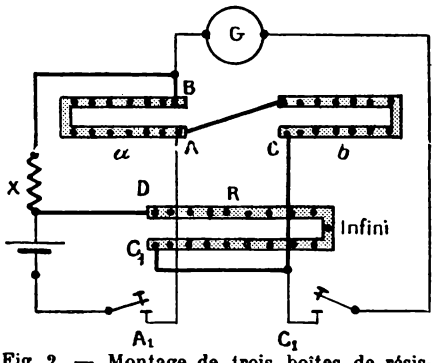


Fig. 2. — Montage de trois boîtes de résistances en pont de Wheatstone

3. — On emploie plus commodément une boîte unique où les connexions ont été effectuées intérieurement par le constructeur.

C'est une *boîte à pont* (fig. 3).

La description du modèle du constructeur Carpentier a été faite dans le cours d'électricité. Rappelons seulement que les résistances du modèle industriel sont étalonnées à 1 : 500 près de leur valeur; la boîte est donc un appareil de précision.

Nous allons indiquer dans le détail son maniement méthodique.

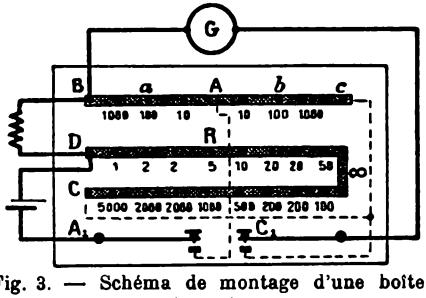


Fig. 3. — Schéma de montage d'une boîte à pont.

4. — Soit à mesurer la résistance d'une bobine de transformateur démontable.

Donnez à *a* et *b* des valeurs égales. Si vous connaissez l'ordre de grandeur de la résistance à mesurer, prenez pour *a* et *b* une valeur de cet ordre. Dans l'incertitude, commencez par $a = b =$ 1 000 ohms.

Shuntez le galvanomètre avec une résistance de 10 à 20 ohms.

Enlevez la fiche « infini » au milieu de la résistance de réglage. Appuyez sur les clés A_1 et C_1 : le galvanomètre dévie, par exemple à droite. Replacez la fiche « infini ».

Retirez la fiche 5 000 ohms. Le spot dévie encore à droite : la valeur 5 000 ohms est trop grande comme l'était la valeur « infini ». Replacez la fiche.

Essayez 2 000 ohms. La déviation est encore à droite. Replacez la fiche.

Essayez 1 000 ohms. Le spot dévie à gauche. La résistance R qui équilibrera le pont est donc comprise entre 1 000 et 2 000 ohms. Cherchez méthodiquement à resserrer les deux branches de cette « fourchette » *en essayant les résistances successives de la boîte dans l'ordre de leurs valeurs décroissantes.*

Pour 1 500 ohms, déviation à gauche.

Pour 1 700 ohms, déviation à droite.

Supprimez alors le shunt pour utiliser toute la sensibilité du galvanomètre.

Pour 1 600 ohms, déviation à gauche.

Pour 1 650 ohms, déviation à droite...

Finalement :

Pour 1 635 ohms, le spot dévie à droite de 12 divisions.

Pour 1 634 ohms, il dévie à gauche de 8 divisions.

La valeur de R est donc 1 634 et 8/20 ohms, soit 1 634,4 ohms.

Si la valeur trouvée pour R était inférieure à 1 000 ohms, il conviendrait de recommencer deux autres mesures en prenant

$a = 100$ ohms, $b = 100$ ohms;
$a = 100$ ohms, $b = 1\,000$ ohms.

Les résultats seraient inscrits dans un tableau du modèle suivant :

MESURES DE LA RÉSISTANCE DE.....
Boîte à pont n° .....

LECTURES			CALCULS
Bras de proportion		Résistance de réglage	
a	b	R	$X = \frac{a}{b} R$
1	2	3	4

Applications.

A. — Résistance à froid d'une lampe 100 watts, 110 volts.

Il s'agit de la lampe dont la résistance a été mesurée à chaud antérieurement (6e manipulation).

Comparer le résultat trouvé avec ceux qui ont été obtenus précédemment.

B. — Résistance d'un galvanomètre.

a) Si l'on dispose de plusieurs galvanomètres, le moyen le plus simple, pour mesurer la résistance de l'un d'eux, est de le monter à la place de la résistance x, fil de suspension détendu pour que le cadre repose immobile sur son noyau et de procéder comme s'il s'agissait d'une résistance ordinaire.

b) Si l'on ne possède qu'un galvanomètre, après l'avoir mis en station, on le branche dans le pont à la place de la résistance à mesurer (fig. 4). La diagonale BC est constituée par un simple fil conducteur. On ajoute en série avec la pile une résistance de protection r que l'on règle pour obtenir une déviation du spot de 100 à 150 divisions. On cherche ensuite par tâtonnements méthodiques une valeur de la résistance R pour laquelle la déviation du galvanomètre reste la même que la clé de la diagonale soit ouverte ou fermée. Quand ce résultat est atteint, c'est qu'aucun courant ne passe dans la diagonale BD, c'est-à-dire que le pont est en équilibre. On applique alors la relation

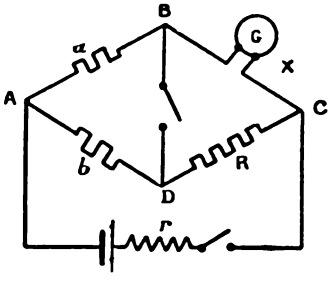


Fig. 4. — Mesure de la résistance d'un galvanomètre, méthode du faux zéro

$$X = \frac{a}{b} R.$$

Ce procédé se nomme *méthode du faux zéro.*

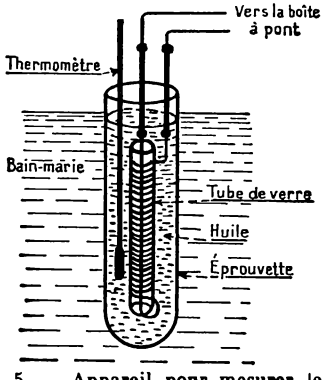


Fig. 5. — Appareil pour mesurer le coefficient de température du cuivre.

C. — Variation de la résistance d'un fil de cuivre avec la température.

Prendre 2 mètres de fil de cuivre de 0,2 millimètre de diamètre isolé au coton ou à la soie et les enrouler en spires serrées sur un tube de verre de 7 ou 8 millimètres, en arrêtant les spires extrêmes par un nœud. Une extrémité du fil revient en arrière par l'intérieur du tube. Deux fils plus gros sont soudés aux extrémités du fil fin pour les connexions à la boîte à pont.

La résistance ainsi constituée est mise dans un long tube à essai empli d'huile, dans lequel plonge un thermomètre. Le tube à essai est placé dans un vase renfermant de l'eau que l'on pourra chauffer (fig. 5).

Mesurez la résistance à la température ambiante. Chauffez l'eau et faites six ou sept mesures jusqu'au voisinage de 100°. Au moment de chaque mesure, supprimez le chauffage pendant quelques instants pour que la température se stabilise.

Pour terminer, mesurez à nouveau la résistance du fil de cuivre à la température ordinaire.

Les résultats seront consignés dans le tableau suivant :

VARIATION DE LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU CUIVRE AVEC LA TEMPÉRATURE.

Température	Résistance	Coefficient moyen d'augmentation de résistance
$t_1 = \ldots$ $t_2 = \ldots$	$R_1 = \ldots$ $R_2 = \ldots$	$a = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)}$

La notice C. 30 de l'USE indique que la valeur adoptée pour le coefficient de température du cuivre aux environs de 20° est 0,00393.

La résistivité à 20° se calcule à partir de la résistivité à $t°$ ($15° < t < 25°$) par la formule :

$$\rho_{20} = \frac{\rho_t}{1 + 0,003\,93\,(t - 20)}.$$

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Soit deux boîtes à fiches de 12 résistances, 1 110 ohms
une boîte à fiches de 16 résistances, 11 110 ohms
deux manipulateurs Morse,
un galvanomètre Deprez-d'Arsonval :

soit
une boîte à pont,
un galvanomètre Deprez-d'Arsonval,
un élément Daniell, ou Leclanché, ou un accumulateur,
résistances diverses.

Emploi d'un pont à fil.

1. — Un pont à fil est un appareil facile à construire.

Le principe en a été indiqué dans le cours d'électricité[1].

En dessinant le schéma de la figure 1 en forme de losange, vous y retrouverez le montage en pont de Wheatstone. Quand le pont est en équilibre :

$$X = \frac{l}{l'} R.$$

Le fil AB est en manganine[2]. Il mesure exactement 1 mètre entre les barres A et B. Son diamètre est de 0,5 à 1 millimètre[3]. Il est tendu sur une règle en bois divisée en centimètres. Il est facile d'apprécier les millimètres.

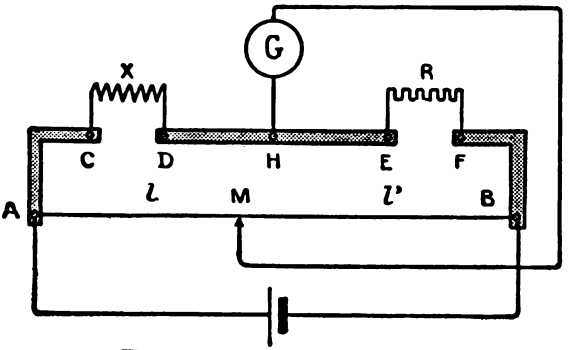


Fig. 1. — Schéma d'un pont à fil.

Le contact mobile M sur le fil de manganine peut s'effectuer avec un fil de cuivre tenu à la main par une poignée isolante. Il est préférable d'imaginer un curseur qui glisse sur la règle graduée en restant toujours en contact avec le fil et d'intercaler des interrupteurs à bouton (interrupteurs de sonnerie), pour fermer le circuit de la pile et celui du galvanomètre seulement pendant les lectures.

Une modification de l'appareil est indiquée dans la figure 2; elle permet d'insérer des résistances X et X' en série avec le fil de manganine.

1. 50e leçon, *Électricité industrielle. Lois générales.*

2. Alliage de Cu 84 %, Mn 12 %, Ni 4 %. Sa résistivité est 42.10^{-6} Ω cm. Il est employé pour fabriquer des résistances de précision et des shunts d'ampèremètre parce que son coefficient de température est faible (2.10^{-5}) ainsi que sa f. é. m. thermo-électrique quand il est en contact avec du cuivre ou du laiton.

3. Résistance de ce fil de 0,1 à 0,5 ohms.

Avec un pont à fil, on emploie parfois un galvanomètre à aiguille plus robuste, mais moins sensible qu'un galvanomètre à miroir; on le nomme *galvanoscope*.

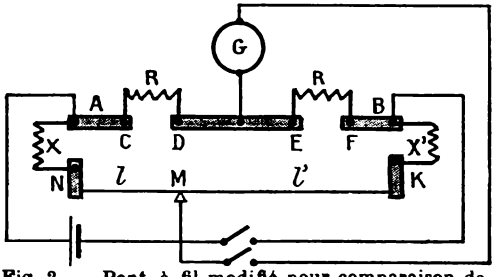


Fig. 2. — Pont à fil modifié pour comparaison de résistances presque égales.

Il est aussi possible de se servir, comme appareil de zéro, d'un écouteur téléphonique que l'on branche à la place du galvanomètre. Le pont doit alors être alimenté par du courant alternatif que l'on produit avec un transformateur de téléphone dont le primaire est monté en série avec un vibrateur, sorte de sonnerie sans timbre, et un ou deux éléments Leclanché, alors que le secondaire alimente le pont à fil (fig. 3). Tant que le pont n'est pas équilibré, une partie du courant alternatif passe dans l'écouteur et le fait vibrer. On déplace le curseur jusqu'à disparition du son dans l'écouteur.

Ce dispositif ne convient que pour des résistances sans self. On peut l'employer pour mesurer la résistance d'un électrolyte et même d'un élément de pile. Dans ce dernier cas, on intercale un condensateur téléphonique de 2 microfarads dans le circuit de l'écouteur pour empêcher le passage de courant continu.

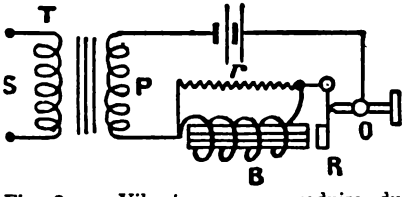


Fig. 3. — Vibrateur pour produire du courant alternatif.
T, S, P, transformateur, B bobine, O contact, R marteau à ressort, *r* fil très résistant pour réduire l'étincelle de rupture.

2. — Un pont à fil sert a mesurer des résistances de l'ordre de quelques ohms à quelques dizaines d'ohms.

Soit à mesurer la résistance d'une sonnerie ordinaire.

Bloquez le trembleur pour que le courant passe dans la sonnerie sans la faire vibrer.

1° Branchez l'appareil entre les bornes C et D du pont; en R, montez une résistance étalonnée de 10 ohms. Mettez le pont en équilibre. Évaluez les longueurs l et l' en millimètres :

$$X = \frac{l}{l'} \times 10.$$

2° Recommencez la mesure en intervertissant X et R.

3° Donnez à la résistance de comparaison une valeur voisine de celle

qui vient d'être trouvée pour X et recommencez les deux mesures.

Inscrivez les lectures et les calculs dans un tableau du modèle suivant :

MESURES DE LA RÉSISTANCE...

LECTURES		CALCULS	
Valeur de R	Valeur de l	Valeur de l'	$X = \frac{l}{l'}R$
1	2	3	4
Moyenne des résultats			

3. — Un pont à fil convient bien pour comparer des résistances qui doivent être égales.

Soit à comparer des résistances X et X' que l'on suppose égales.

On les monte respectivement en AN et BK (fig. 2). Entre C et D E et F, on place des résistances étalonnées égales, R, du même ordre de grandeur que X et X'.

Désignons par r la résistance d'un millimètre du fil de manganine. Quand le pont est en équilibre :

$$\frac{X + lr}{X' + l'r} = \frac{R}{R}$$

d'où

$$X + lr = X' + l'r, \quad \text{soit} \quad X - X' = (l' - l)\, r.$$

Applications.

Construction d'une résistance de valeur déterminée.

Les résistances des boîtes à fiches ne supportent que de faibles intensités. Des résistances de valeur connue qui peuvent être traversées par plusieurs ampères sont fort utiles dans un laboratoire. Proposons-nous de fabriquer l'une de ces résistances, par exemple 5 ohms pour 4 à 5 ampères, réalisée à 0,01 près de sa valeur.

Choix du métal. — Un métal à faible coefficient de température est nécessaire : si nous employions du fer dont le coefficient de température est environ 0,006 2, il suffirait d'une variation de température de 2 degrés pour que la résistance variât de plus de 0,01.

A défaut de constantan ou de manganine, nous utiliserons du maille-

chort ($a = 2{,}7 \cdot 10^{-4}$), ou de l'alliage[1] RNC_2 des Aciéries d'Imphy ($a = 1{,}2 \cdot 10^{-4}$).

Avec ce dernier métal, la température pourra varier de

$$0{,}01 : 0{,}000\,12 = 80^{\circ}$$

sans que la résistance augmente ou diminue de 1 %.

Section du fil. — Une table fournie par le fabricant du métal indique que, pour l'élévation de température admissible et une intensité de 5 ampères, il convient d'employer du fil cylindrique (RNC_2) de 1,5 millimètre de diamètre.

Longueur du fil. — La résistance d'un tel fil est 0,63 ohm par mètre. La longueur nécessaire pour 5 ohms est donc

$$5 : 0{,}63 = 8 \text{ mètres.}$$

Nous en utiliserons 8,40 mètres pour tenir compte de l'incertitude de la valeur de la résistivité et nous ménager une bonne marge de réglage.

Carcasse de l'appareil. — Bien des formes sont possibles, nous nous contenterons d'enrouler le fil sur un support en bois paraffiné (fig. 4). Une spire mesure 0,44 mètre. Le fil forme 18 spires, 18 petites entailles (2 × 2), sont faites sur les extrémités du support à intervalles de 8 millimètres.

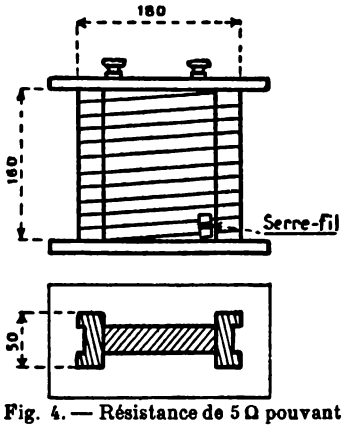


Fig. 4. — Résistance de 5 Ω pouvant supporter 5 A.

Le fil résistant est plié en deux au milieu de sa longueur et les deux brins sont enroulés en même temps chacun dans une entaille. Les extrémités sont serrées sous deux bornes à la partie supérieure de l'appareil.

Réglage de la résistance. — On modifie la longueur active du fil en déplaçant un serre-fil, fait de deux barrettes de laiton serrées par une vis, qui réunit les deux brins de la résistance.

On vérifie la résistance obtenue en la comparant à une résistance de 5 ohms d'une boîte à fiches par l'une ou l'autre des méthodes d'emploi du pont à fil.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Deux ponts à fil (un de chaque modèle : fig. 1 et fig. 3).
Une boîte de résistances à fiches.

1. L'alliage RNC_2 est fait de 60 % de Ni, 11 % de Cu, 29 % de fer. Sa résistivité est 111 microhms-centimètres.

Mesure de très faibles résistances avec un double pont.

1. — Le montage en double pont élimine les résistances des contacts et des connexions.

Quand on emploie une boîte à pont ou un pont à fil, les fils de connexion sont en série avec la résistance de réglage et la résistance à mesurer. Leurs résistances et celles des contacts produisent une erreur inadmissible quand il s'agit de mesurer une très faible résistance, comme celle d'un shunt d'ampèremètre, parce que ces résistances sont du même ordre de grandeur que la résistance à évaluer.

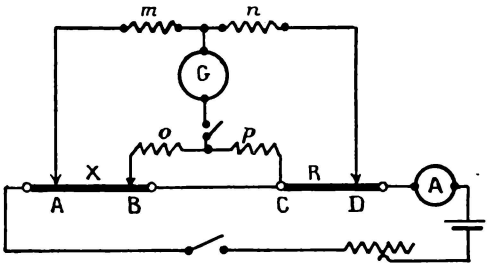


Fig. 1. — Montage en double pont de Thomson.

Cette cause d'erreur n'existe pas quand on emploie le montage en double pont de Thomson.

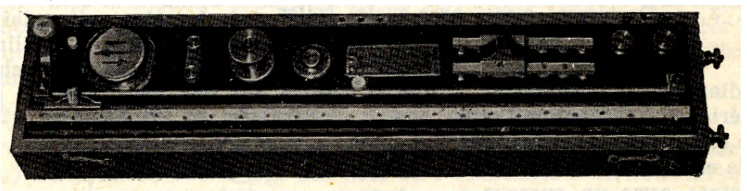


Fig. 2. — Double pont, construction Chauvin-Arnoux.

Le schéma de ce montage est donné par la figure 1. Le principe de la méthode a été indiqué dans le cours d'électricité[1].

En disposant les bras de proportion pour que $\frac{m}{n} = \frac{o}{p}$ et en réglant la longueur CD, c'est-à-dire la résistance R, pour qu'aucun courant ne passe dans le galvanomètre :

$$X = \frac{m}{n} R.$$

1. 50e leçon, *Électricité industrielle, Lois générales.*

2. — On réalise un montage en double pont avec des boîtes de résistances étalonnées.

Plusieurs constructeurs d'appareils de mesure électriques fabriquent des doubles ponts dont l'aspect varie avec le fabricant. Il est facile d'y retrouver le montage schématique de la figure 1 et de les mettre en service en s'aidant de la notice du constructeur (fig. 2).

A défaut, un double pont peut être établi avec des boîtes de résistances étalonnées. L'appareil comprend deux parties :

1° les résistances de proportion *m*, *n*, *o*, *p*;

2° la résistance étalon R.

a) **Deux moyens sont possibles pour constituer les résistances de proportion :**

ou employer quatre boîtes de résistances à fiches, par exemple deux de 1 110 ohms à 12 bobines, deux de 11 110 ohms à 16 bobines; on les accouple comme l'indique la figure 3;

ou se servir de deux boîtes à pont (fig. 4).

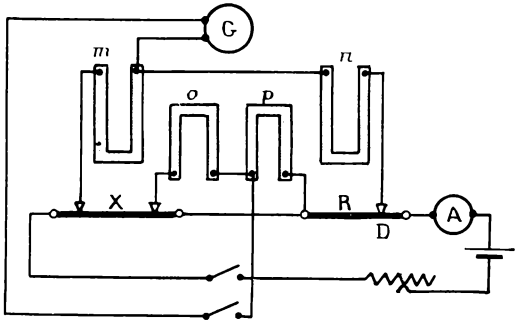


Fig. 3. — Doublepont monté avec quatre boîtes de résistances.

b) La résistance étalon est constituée par une tige cylindrique longue de 1 mètre, soit en laiton de diamètre 3 millimètres, soit en maillechort de diamètre 5 millimètres. L'une et l'autre ont une résistance un peu supérieure à 0,01 ohm. Cette tige est montée le long d'une règle en bois divisée en centimètres avec un curseur à contact analogue à celui d'un pont à fil.

L'appareil est d'abord monté pour étalonner la résistance R de la tige. On prend comme résistance de comparaison X celle d'un shunt de 0,01 ohm (shunt de 10 A, 0,1 V). L'intensité utilisée est d'environ 5 ampères.

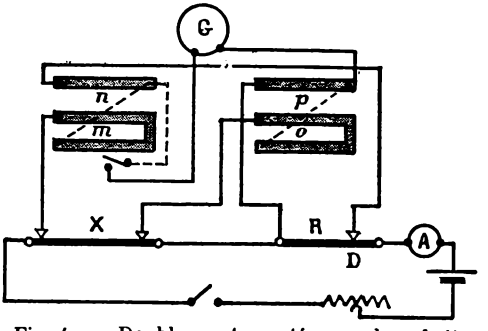


Fig. 4. — Double pont monté avec deux boîtes à pont.

On choisit comme résistances de proportion $m = n = o = p = 1\,000\,\Omega$.

On met le pont en équilibre en déplaçant le contact D sur la résistance R. La longueur L de cette résistance en circuit a donc une résistance égale à X, soit 0,01 ohm.

Le curseur D de contact sur la résistance R est guidé par une règle en laiton. On repère ses positions sur la règle à l'origine et à l'extrémité de la longueur L et l'on divise l'intervalle entre ces deux positions en 100 parties égales. Pour un déplacement du curseur de 1 division de la règle, la résistance R varie donc de 0,01 : 100 = 0,000 1 Ω.

3. — Deux exemples d'emploi d'un double pont.

1° *Mesure de la résistance d'un shunt d'ampèremètre.*

Le shunt est monté entre les points A et B (fig. 1).

Les dérivations sont prises aux bornes ou aux trous prévus pour les connexions des cordons de l'ampèremètre, puisque la résistance mesurée est celle qui est comprise entre ces dérivations.

La source de courant est un accumulateur capable de débiter 5 ou 6 ampères. Un rhéostat et un ampèremètre servent à régler ce courant à environ 5 ampères si le shunt à mesurer peut supporter cette intensité. Il n'y a pas intérêt à réduire cette valeur, ce qui diminuerait la sensibilité du double pont.

Une première mesure est faite avec $m = n = o = p = 1\,000$ ohms. Elle indique si d'autres mesures peuvent être effectuées avec d'autres rapports des résistances de proportion.

Dans le cas où le montage est fait avec deux boîtes à pont, les valeurs extrêmes du rapport $m : n$ sont environ 0,001 et 1 000 ; puisque la résistance de R varie facilement depuis moins de 0,001 ohm jusqu'à 0,01 ohm, les limites entre lesquelles doit être comprise la résistance X à mesurer sont 1 microhm et 10 ohms. Il n'y a d'ailleurs aucun avantage à utiliser le double pont pour mesurer des résistances supérieures à 1 ohm.

2° *Mesure de la résistivité d'une tige de métal.*

Aux opérations précédentes, s'ajoute la détermination précise :

a) de la section de la tige qui doit être constante d'un bout à l'autre, on en mesure le diamètre avec un palmer;

b) de la distance des prises de dérivations sur cette tige : le plus simple est d'effectuer ces dérivations en posant la tige sur deux couteaux en V [1] dont la distance, de l'ordre de 30 centimètres, est mesurée avec une règle graduée, à 0,2 millimètre près.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Soit un double pont tout monté, soit un montage fabriqué par l'École, ainsi qu'il est indiqué plus haut avec deux boîtes à pont ou avec deux boîtes de résistances à fiches de 1 110 ohms et deux boîtes de 11 110 ohms.

1. **Voir 3e manipulation, fig 3.**

Mesure de la résistance d'isolement d'un appareil ou d'une installation.

1. — Définissons la résistance d'isolement :

a) d'un appareil électrique. — C'est la résistance entre les circuits et la masse ou carcasse de l'appareil. Parfois, il y a intérêt à mesurer aussi la résistance d'isolement entre les divers circuits normalement distincts.

Par exemple, l'enroulement de l'induit et celui des inducteurs d'un moteur à courant continu doivent être isolés l'un de l'autre et posséder par rapport à la carcasse du moteur une résistance d'isolement supérieure à 10 mégohms quand la machine est neuve.

Un appareil électro-ménager, comme un fer à repasser, doit avoir entre les fils parcourus par le courant et la masse une résistance supérieure à 1 mégohm.

b) d'une installation électrique[1]. — C'est la résistance entre les conducteurs de la ligne de distribution, tous les appareils récepteurs tels que lampes, moteurs, transformateurs étant hors circuit, mais, par

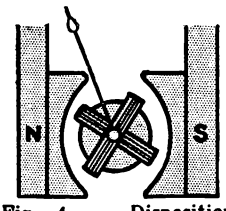


Fig. 1. — Disposition des bobines d'un logomètre. Remarquez que les pièces polaires de l'aimant ne sont pas concentriques avec le noyau.

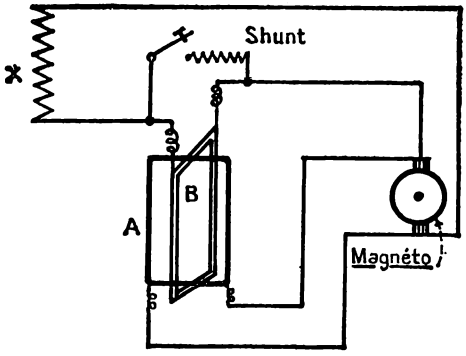


Fig 2. — Schéma d'un ohmmètre à magnéto, à deux portées de mesures.

1. Voir la publication C 15.100 de l'Union technique de l'Électricité.

contre, tous les interrupteurs, fusibles, prises de courant et pièces diverses d'appareillage nécessaires au service étant à leurs places respectives et dans la position de fonctionnement.

L'U. T. E précise les conditions de la mesure dans la norme C 15 100. Sauf pour les installations à très basse tension, la mesure de l'isolement est effectuée à l'aide de courant continu sous une tension de 500 *V* au minimum, le pôle + étant réuni à la terre dans le cas d'une mesure d'isolement par rapport au sol.

Pendant la mesure, les conducteurs de l'installation ou de la partie d'installation à vérifier sont déconnectés de la source d'énergie.

On mesure la résistance d'isolement :

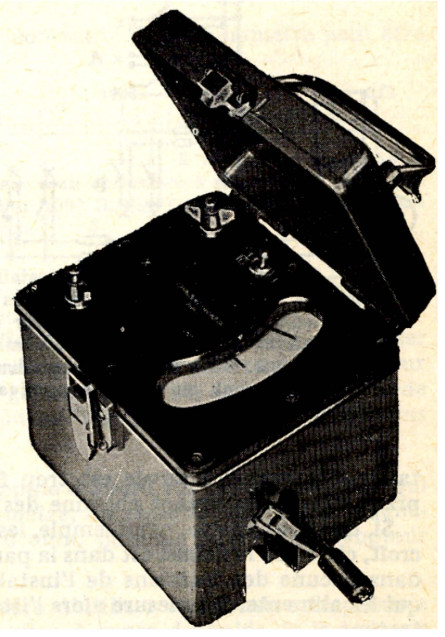
— pour toute l'installation si sa longueur n'exède pas 100 m;

— pour des tronçons successifs n'excédant pas 100 m lorsque l'installation est plus longue.

La valeur de la résistance d'isolement ne doit pas être inférieure à 1 000 *ohms par volt* de tension de service, sans être jamais inférieure à 250 000 *ohms*.

2. — L'appareil le plus commode pour la mesure des résistances d'isolement est l'ohmmètre à magnéto.

Le principe de cet instrument est étudié dans le cours d'électricité [1] (fig. 1, 2 et 3).



Cliché Chauvin-Arnoux.

Fig. 3. — Ohmmètre à magnéte. Le commutateur de changement de portée de mesure n'est pas visible.

La magnéto des modèles récents fournit une tension continue d'environ 500 volts. Rappelons que l'emploi d'un galvanomètre-logomètre rend les indications de l'ohmmètre indépendantes de la tension, et, par suite, de la vitesse avec laquelle on tourne la manivelle de la magnéto.

Un commutateur sert à mettre en service l'une ou l'autre des capacités de mesure de l'ohmmètre, soit 0-10 mégohms, soit 0-100 mégohms. La longueur de l'échelle du cadran est petite pour une aussi grande variation de la résistance; il en résulte que l'appareil ne permet pas de mesures précises; c'est un outil de monteur-électricien.

1. 49 leçon, ***Électricité industrielle, Lois générales.***

Exemple d'emploi. — Soit à mesurer l'isolement de l'installation d'un abonné.

1° On coupe le courant au tableau d'arrivée. Les lampes, les réchauds sont enlevés, tous les appareils récepteurs sont déconnectés ; les coupe-circuits sont en place, les interrupteurs enclenchés.

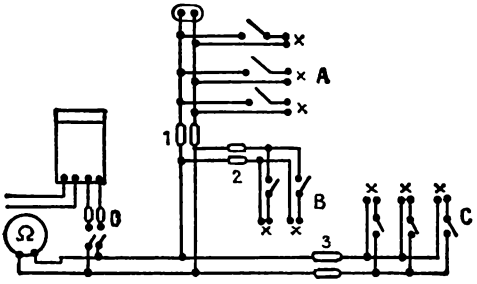


Fig. 4. — Mesure de l'isolement d'une installation d'éclairage. Les lampes sont enlevées; les interrupteurs, représentés ouverts pour qu'ils soient visibles, sont enclenchés. L'ohmmètre est monté en Ω. S'il y a lieu, pour localiser les défauts d'isolement, on enlève successivement les fusibles 1, 2 et 3.

Les deux conducteurs de la ligne sont branchés aux bornes de l'ohmmètre. On tourne la manivelle et on lit la résistance d'isolement entre les conducteurs (fig. 4).

2° On mesure aussi la résistance d'isolement entre chacun des conducteurs et la terre, en prenant comme terre une canalisation d'eau. On a soin de décaper la région où l'on enroule le fil relié à l'ohmmètre.

3° Dans le cas où la résistance d'isolement trouvée est trop faible, on localise le défaut en supprimant successivement chacune des parties de l'installation.

Si, quand on enlève, par exemple, les fusibles 2, la résistance d'isolement croît, c'est que le défaut est dans la partie B. Quand on ne trouve le défaut dans aucune des fractions de l'installation, c'est qu'il est sur la ligne qui les alimente. On mesure alors l'isolement de cette ligne, tronçon par tronçon.

3. — Il existe des ohmmètres à pile intérieure.

L'un de ces appareils comprend dans une même boîte une batterie de 16 éléments de pile sèche et un galvanomètre dont l'aiguille dévie de toute son échelle pour 0,015 ampère. La batterie, le galvanomètre et une résistance additionnelle sont en série. Cette résistance et le cadre ont ensemble une résistance R de 1 000 ohms, par rapport à laquelle la résistance de la batterie est négligeable. On branche la résistance à mesurer X aux bornes du circuit (fig. 5).

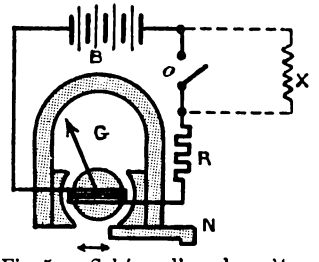


Fig. 5. — Schéma d'un ohmmètre à pile intérieure. B, batterie; G, galvanomètre; N, shunt magnétique; R, résistance additionnelle; O interrupteur X, résistance à mesurer

De la relation $I = \frac{E}{R + X}$ résultant de l'application de la loi d'Ohm au circuit, on tire

$$X = \frac{E}{I} - R.$$

En admettant que la f. é. m. E soit constante, le galvanomètre peut être gradué en ohms (fig. 6). Remarquez que la valeur de R, 1 000 ohms, marque le milieu de l'échelle, puisque pour X = R, l'intensité est moitié moins grande que pour X = 0 : le constructeur peut donc déterminer le calibre de mesure de l'appareil par le choix de la résistance additionnelle.

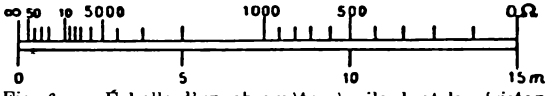


Fig. 6. — Échelle d'un ohmmètre à pile dont la résistance intérieure est de 1000 Ω. Sur l'appareil, cette échelle est un arc de cercle.

Mais la f. é. m. de la batterie s'affaiblit avec le temps. Pour compenser ses variations, une dérivation magnétique N en fer doux est montée sur les pièces polaires de l'aimant du galvanomètre et, en se déplaçant de l'une à l'autre sous l'action d'un bouton tournant, shunte plus ou moins le circuit magnétique.

Pour effectuer une mesure, on appuie d'abord sur un interrupteur qui branche la batterie sur le galvanomètre, on règle la dérivation magnétique pour que l'aiguille marque 0 ohm, puis on ouvre l'interrupteur et on lit la valeur de X.

On reproche à ce type d'ohmmètre d'utiliser une tension trop faible et surtout d'être fatigant à transporter, à cause du poids de la batterie qu'il contient.

4. — On mesure aussi la résistance d'isolement par rapport à la terre d'une ligne bifilaire en fonctionnement par la méthode du voltmètre.

L'emploi du voltmètre à la mesure d'une grande résistance a fait l'objet de la 4e manipulation.

Soit à mesurer la résistance d'isolement par rapport au sol d'une ligne à deux fils X et Y à courant continu. On dispose d'un voltmètre à cadre mobile et aimant fixe de résistance intérieure connue R. Soient x et y les résistances d'isolement à déterminer des conducteurs X et Y.

1° On monte le voltmètre entre X et Y, il indique une tension U (fig. 7-1).

2° On le monte entre X et la terre, il indique une tension u (fig. 7-2).

3° On le branche entre Y et la terre : il indique une tension v (fig. 7-3).

Quand le voltmètre est monté entre X et la terre, sa résistance R est

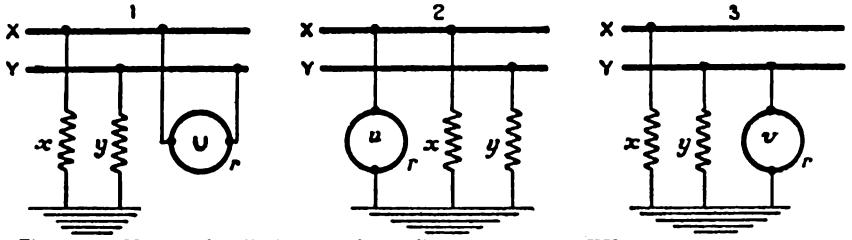


Fig. 7. — Mesure de l'isolement de la ligne en charge XY. En 1, on mesure la tension v entre les fils de ligne. En 2, on mesure la tension u entre X et la terre, les résistances x et r sont en parallèle, y en série avec les deux. En 3, on mesure la tension v entre Y et la terre. les résistances y et r sont en parallèle, x en série avec les deux. (Dans le texte, la résistance du voltmètre est désignée par R et non par r.)

en parallèle avec la résistance d'isolement x, la résistance entre le conducteur et le sol a pour valeur $\frac{R + x}{R x}$. De X à Y, en passant par le sol, la résistance est donc

$$\frac{R x}{R + x} + y.$$

Puisque la tension entre X et Y est U, le courant qui passe d'un conducteur à l'autre a pour intensité

$$U : \left(\frac{R x}{R + x} + y\right) = \frac{U (R + x)}{x y + R (x + y)}$$

La chute de tension dans y est alors :

$$\frac{U (R + x) y}{x y + R (x + y)}$$

celle de X à T est u, donc :

$$u + \frac{U (R + x) y}{x y + R (x + y)} = U.$$

En simplifiant :

$$U R x = u [x y + R (x + y)] \qquad (1)$$

Quand le voltmètre est monté entre Y et la terre, la relation devient :

$$U R y = v [x y + R (x + y)] \qquad (2)$$

En divisant membre à membre les équations (1) et (2)

$$\frac{x}{y} = \frac{u}{v} \qquad (3)$$

En éliminant y entre (1) et (3), on obtient :

$$x = \frac{R}{v}[U - (u + v)]$$

en éliminant x entre (2) et (3)

$$y = \frac{R}{u}[U - (u + v)].$$

Si la ligne est à courant alternatif et sous tension, la mesure de son impédance d'isolement est possible avec un voltmètre à courant alternatif. Un voltmètre de résistance élevée donnera une mesure de meilleure précision.

5. La méthode des déviations comparées sert, dans l'industrie, à la mesure de la résistivité des isolants moulés.

Soit à mesurer la résistance d'un échantillon de fibre rouge. L'éprouvette dont on dispose est un parallélépipède rectangle de 20 × 100 × 150 millimètres (fig. 8). La fibre est serrée entre quatre bandes de laiton larges de 25 millimètres, garnies de plomb pour assurer un bon contact. C'est à ces bandes que l'on amène le courant, qui traverse ainsi une section de 30 centimètres carrés de fibre sur une longueur approximative de 5 centimètres (fig. 9).

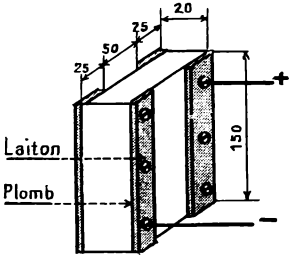


Fig. 8. — Eprouvette de fibre garnie de barrettes pour amener le courant.

L'appareil de mesure employé est un microampèremètre de calibre 150 microampères, dont l'échelle comporte 150 divisions et dont la résistance est de 100 ohms. On pourrait aussi se servir d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval, plus sensible encore.

On utilise une f. é. m. continue de l'ordre de 250 volts.

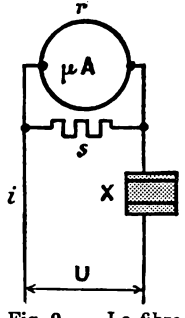


Fig. 9. — La fibre de résistance X est en circuit, l'ampèremètre indique i microampères.

On shunte le microampèremètre par une résistance étalonnée $s = 50\ \Omega$. L'éprouvette de fibre est mise en série avec l'appareil de mesure sous une tension U (fig. 9).

L'aiguille de l'ampèremètre indique une intensité $i = 90$ microampères.

La résistance équivalente à l'ampèremètre avec son shunt est $\frac{rs}{r+s}$. La résistance totale du circuit a pour valeur

$$X + \frac{rs}{r+s}.$$

La quantité $\frac{rs}{r+s}$ est négligeable par rapport à X. En effet, X est de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'ohms, $\frac{r}{r+s}$ est inférieur à 1 et s ne dépasse pas quelques dizaines d'ohms. On peut donc admettre que le courant total I dans la fibre est $I = U : X$, et que l'intensité dans le galvanomètre est :

$$i = I\frac{s}{r+s} = \frac{U}{X}\frac{s}{r+s} \qquad \text{d'où} \qquad X = \frac{U}{i}\frac{s}{r+s} \qquad (1)$$

Recommençons la mesure en remplaçant X par une résistance connue R de, par exemple, 100 000 ohms et en shuntant l'ampèremètre par une résistance $s' = 4$ ohms (fig. 10).

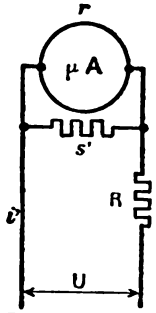


Fig. 10. — Une résistance connue R est en circuit, l'ampèremètre indique i' microampères.

Le microampèremètre indique $i' = 95$ microampères.

En reprenant les calculs faits pour la mesure précédente, on trouve

$$R = \frac{U}{i'}\frac{s'}{r+s'} \qquad (2)$$

Divisons membre à membre les relations (1) et (2) :

$$X = R \times \frac{i'}{i} \times \frac{\frac{r+s'}{s'}}{\frac{r+s}{s}}$$

On donne à $\frac{r+s'}{s'} = m'$ et $\frac{r+s}{s} = m$ le nom de *pouvoir multiplicateur des shunts* correspondants[1] et la formule de calcul de X devient :

$$X = R.\frac{i'}{i}.\frac{m'}{m} \qquad (3)$$

Cette formule ne contient pas la valeur de la f. é. m. employée, les intensités i' et i n'y interviennent que par leur rapport, il est donc inutile que le microampèremètre ou le galvanomètre dont on se sert soit étalonné. Si la résistance R et les pouvoirs multiplicateurs m et m' sont déterminés avec précision par le constructeur, la méthode est précise.

Exemple. — En utilisant les nombres relevés au cours des mesures précédentes, on trouve pour m et m' les valeurs $m = 3$ et $m' = 26$. Donc :

$$x = 100\,000 \times \frac{95}{90} \times \frac{26}{3} = 915\,000 \text{ ohms.}$$

Cette résistance donne approximativement pour la résistivité de la fibre

$$\rho = 915\,000 \times \frac{30}{5},$$

1. $\frac{r+s}{s}$ est en effet le nombre par lequel il faut *multiplier* l'intensité du courant qui passe dans l'ampèremètre pour avoir le courant total.

soit 5,5 mégohms-centimètres, valeur relativement faible, bien inférieure à la résistivité d'un bois bien sec la fibre est en effet un isolant médiocre.

Applications.

A. — Mesure de la résistance d'isolement d'un appareil électroménager (fer à repasser ou réchaud) :

1° avec un ohmmètre à magnéto;
2° avec un voltmètre.
Comparer les valeurs trouvées.

B. — Mesure de la résistance d'isolement d'un moteur à courant continu :

1° entre l'induit et les inducteurs;
2° entre les enroulements et la masse en se servant d'un ohmmètre, puis d'un voltmètre.

C. — Mesure de l'isolement d'une installation d'éclairage.

Recherche d'un défaut d'isolement.

D. — Mesure de grandes résistances par la méthode des déviations comparées.

Résistances du capacimètre à lampe au néon (21e manipulation). Grandes résistances employées dans les postes de TSF.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un ohmmètre à magnéto.
Un voltmètre à cadre mobile et aimant fixe.
Un voltmètre électromagnétique résistant.
Un microampèremètre.
Des résistances étalonnées.

Note sur le montage d'un milliampèremètre en ohmmètre à lecture directe.

Nous disposons d'un milliampèremètre dont la portée de mesure est 0-1 milliampère et la résistance 250 ohms; nous nous proposons de le monter en ohmmètre fonctionnant avec une pile de lampe de poche de 4,5 volts.

1. — Schéma de principe de l'appareil.

Il est représenté par la figure 1. Le milliampèremètre, *m*A, a une résistance propre *r;* R est une résistance de protection étalonnée; X, la résistance à mesurer, est mise en circuit ou hors-circuit par la manette M qui peut occuper les trois positions 1, 2, 3; une pile de f. é. m. E alimente l'appareil.

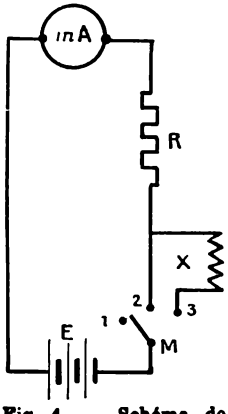


Fig. 1. — Schéma de principe d'un ohmmètre à pile.

On place d'abord M dans la position 2 et on lit l'indication I du milliampèremètre; on met ensuite M sur le plot 3, on lit la nouvelle indication I'.

Dans la première mesure, en ne tenant pas compte de la résistance intérieure de la pile qui est négligeable par rapport à celle du reste du circuit :

$$E = (R + r)\ I$$

Dans la seconde mesure :

$$E = (R + r + X)\ I'$$

Donc

$$X = (R + r)\ \frac{I - I'}{I'} \qquad (1)$$

2. — Un dispositif de tarage de l'ohmmètre doit être ajouté.

La f. é. m. de la pile ne reste pas constante, elle diminue peu à peu quand la batterie vieillit. La valeur de I dans la formule (1) n'est pas toujours la même, et l'étalonnage du milliampèremètre en ohmmètre n'est pas possible sans un organe de réglage qui amène I toujours à la même valeur malgré les variations de E. C'est un rhéostat *s* qui shunte le milliampèremètre (fig. 2).

Quand E diminue, on augmente la résistance de *s* pour accroître la fraction du courant qui traverse le milliampèremètre.

3. — Déterminons les valeurs des résistances de l'appareil.

La batterie de piles possède une f. é. m. de 4,5 volts quand elle est neuve. Elle doit servir tant que cette f. é. m. ne descendra pas au-dessous de 4 volts.

Pour qu'une f. é. m. de 4 volts produise 0,001 ampère dans le milliampèremètre quand la résistance X n'est pas en circuit, il faut que la résistance totale du circuit soit 4 000 ohms, la résistance de protection R aura pour valeur 3 750 ohms.

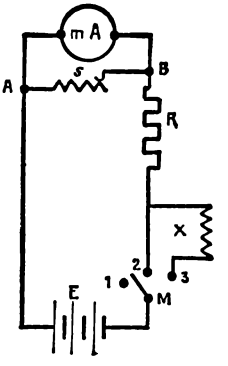


Fig. 2. — Le rhéostat *s* shunte le milliampèremètre, il sert à compenser l'affaiblissement de E.

Le shunt *s* doit permettre de régler le courant à 0,001 ampère dans le milliampèremètre quand la f. é. m. de la pile est à son maximum, soit 4,5 volts et que la résistance X est hors-circuit.

La tension entre les points A et B est alors 250 × 0,001 = 0,25 volt. C'est aussi la chute de tension dans le shunt *s*. En représentant le courant dans ce shunt par *i* :

$$s.i = 0,25$$

L'intensité totale dans le circuit (0,001 + *i*) produit dans la résistance de protection une chute de tension (0,001 + *i*). 3 750 qui est égale à 4,5 — 0,25 = 4,25 volts, donc

$$(0,001 + i) \cdot 3\,750 = 4,25$$

$$\text{et} \quad i = \frac{4,25}{3\,750} - 0,001 = \frac{1}{7\,500} \text{ ampère}$$

Puisque $s.i = 0,25$,

$$s = 0,25 : \frac{1}{7\,500} = 1\,875 \text{ ohms.}$$

Cette résistance du shunt devra croître en même temps que la f. é. m. de la pile diminuera pour être extrêmement grande quand E = 4 volts. Vous établirez facilement que, dans le cas où R = 3 750 ohms, pour un milliampèremètre de 0,001 ampère et 250 ohms, la résistance de *s* en fonction de E est :

$$s = \frac{937,5}{E - 4} \text{ ohms}$$

Elle croît hyperboliquement quand E se rapproche de 4 volts.

Le shunt sera constitué par un petit rhéostat à fil très fin de 15 000 ohms avec une dizaine de plots de réglage et prises à 1 800, 2 000, 2 300, 2 600, 3 000, 3 700, 4 600, 6 500, 9 000 et 15 000 ohms. Il n'est pas nécessaire que ces résistances soient déterminées avec précision.

4. — Mode d'emploi.

La pile et la résistance à mesurer étant branchées, on place la manette M sur le plot 2 (fig. 2). On règle le shunt *s* pour que l'aiguille du milliampèremètre s'arrête sur la division 100. On fait passer la manette M à la position 3, l'aiguille du galvanomètre indique un courant I' évalué en centièmes de milliampère.

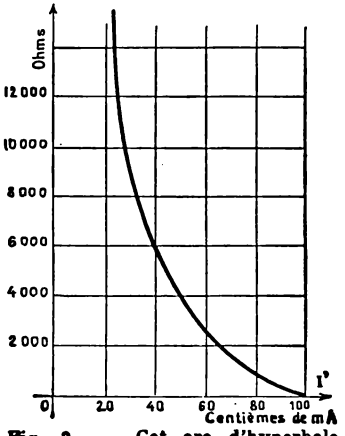


Fig. 3. — Cet arc d'hyperbole représente les variations de X en fonction de I'.

La résistance X est calculable à l'aide de la formule (1) qui devient en l'espèce

$$X = 4\,000 \cdot \frac{100 - I'}{I'} \qquad (2)$$

Par exemple pour I' = 40 centièmes de milliampère,

$$X = 4\,000 \cdot \frac{60}{40} = 6\,000 \text{ ohms.}$$

5. — Graduons en ohms l'échelle du milliampèremètre.

La formule (2) qui s'écrit

$$X = \frac{400\,000}{I'} - 4\,000$$

montre que la courbe de X en fonction de I' est une branche d'hyperbole dont l'axe des ordonnées est une asymptote et qui coupe l'axe des abscisses au point 100. Cette courbe est représentée par la figure 3.

La correspondance, pour quelques points, entre la graduation du milliampèremètre et celle de l'ohmmètre est la suivante :

I'	4	10	20	40	50	60	80	100	centièmes de *m*A
X	96 000	36 000	16 000	6 000	4 000	2 660	1 000	0	ohms.

La figure 4 représente l'échelle de l'ohmmètre dessinée sommairement au-dessus de celle du milliampèremètre. Elle montre que les lectures ne sont guère possibles qu'entre 0 et 40 000 ohms; elles sont peu précises parce que l'échelle est relativement courte.

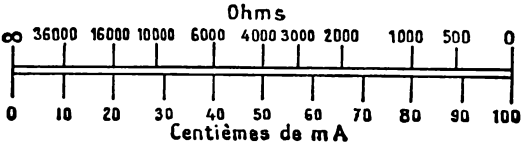


Fig. 4. — Juxtaposition des échelles de l'ohmmètre et du milliampèremètre.

6. — Il est possible de changer la portée pratique de mesure de l'ohmmètre.

L'échelle est toujours graduée depuis 0 correspondant à I' = 100 jusqu'à l'infini pour I' = 0, mais il est possible d'amener vers le milieu de l'échelle telle région de la graduation que l'on juge intéressante. Voici deux moyens que l'on peut employer.

1° Shuntons le milliampèremètre et sa résistance de protection entre les points C et D (fig. 5) :

a) *au dixième*, par une résistance de $\frac{4\,000}{9}$ = 444 ohms; le courant qui passe dans la résistance de protection est le *dixième* du courant dans la résistance X, comme si cette résistance était devenue 10 fois plus forte qu'elle n'est en réalité; il faut donc diviser par 10 les indications de l'échelle de l'ohmmètre.

b) *au centième*, par une résistance des $\frac{4\,000}{99}$ = 40,4 ohms; les lectures seront alors à diviser par 100.

Un commutateur à trois positions permet d'utiliser le calibre de mesure le plus convenable.

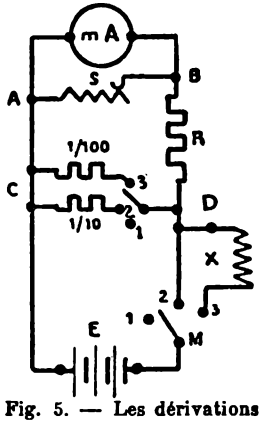


Fig. 5. — Les dérivations placées entre C et D modifient la portée de mesure de l'ohmmètre.

Remarquons que les résistances de dérivation déterminées dans le cas où le circuit de mesure est de 4 000 ohms sont un peu trop grandes quand le shunt de tarage est en circuit, mais l'erreur qui en résulte est négligeable.

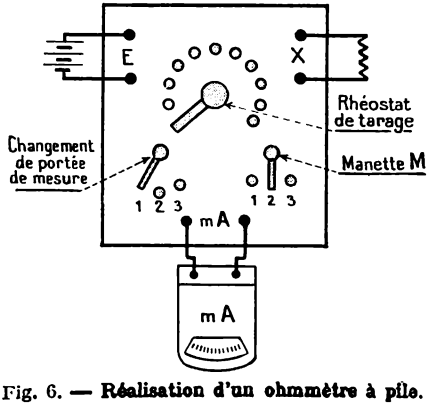


Fig. 6. — **Réalisation d'un ohmmètre à pile.**

2° Quand l'aiguille de l'ohmmètre de la figure 2 est au milieu de l'échelle, la résistance X est égale à celle du milliampèremètre avec sa résistance de protection. Cette remarque indique comment on peut déterminer les éléments d'un ohmmètre pour telle résistance moyenne que l'on désire.

Par exemple, avec une résistance de protection R = 99 750 ohms donnant une résistance

totale de 100 000 ohms au circuit de mesure, le milieu de l'échelle de l'ohmmètre sera marqué 100 000 ohms et l'appareil pourra servir de 1 000 à 800 000 ohms.

Pour produire 0,001 ampère dans le milliampèremètre quand la résistance à mesurer n'est pas en circuit, il faudra 100 volts aux bornes de l'ohmmètre. En shuntant le milliampèremètre par un rhéostat variable de 1 000 à 30 000 ohms, on pourra utiliser une f. é. m. comprise entre 100 et 120 volts.

L'isolement des différentes parties de l'appareil devra être soigné si l'ohmmètre est destiné à mesurer de grandes résistances. L'appareil, vu par-dessus, aura l'aspect indiqué par la figure 6.

Mesure de la résistance des prises de terre.

1. — Des prises de terre sont prescrites par les règlements dans la plupart des installations électriques.

Un décret du 4 août 1935, relatif à la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques, oblige à mettre à la terre les bâtis de machines électriques, les pylônes et poteaux en fer supportant des lignes de transport d'énergie, les dispositifs métalliques de protection dans toutes les installations où la tension efficace dépasse 150 volts entre phases et neutre.

Le défaut d'isolement des parties de machines ou des conducteurs sous tension ne risque plus de rendre dangereux, pour les ouvriers, un contact avec des carcasses ou des pièces normalement inoffensives.

Les prises de terre, *distinctes pour chaque machine importante*, sont constituées par des plaques en fer galvanisé planes ou enroulées en cylindre (fig. 1), des tubes en cuivre armé d'acier qui ont jusqu'à 3 mètres de longueur, des piquets, des grillages, enfoncés ou enterrés au moins à un mètre et demi de profondeur dans un bon sol humide.

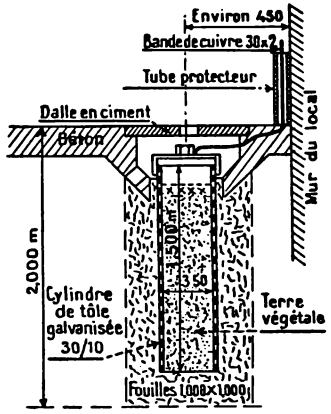


Fig. 1. — Prise de terre, type C P D E (Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité).

2. — La mesure de la résistance de ces prises de terre doit être effectuée une fois au moins par an.

L'électricien chargé de cette opération en consigne les résultats numériques dans un registre spécial, soumis au contrôle de l'Inspection du travail.

3. — Que faut-il entendre par la résistance d'une prise de terre ?

Remarquons qu'un courant continu, circulant dans le sol, électrolyse l'eau plus ou moins chargée de sels minéraux qui imbibe la terre en produisant une force contre-électromotrice qui s'oppose à son passage. Pour éviter ce phénomène, on utilise exclusivement des courants alternatifs dans les mesures concernant les prises de terre.

Expérience. — Établissons deux prises de terre A et B à une vingtaine de mètres l'une de l'autre (fig. 2). Relions-les aux bornes du secondaire d'un transformateur monophasé, capable de fournir quelques centaines de watts et une centaine de volts[1]. Un rhéostat (10 Ω, 5 A) et un ampèremètre (5 A) sont montés sur le conducteur qui relie A et B.

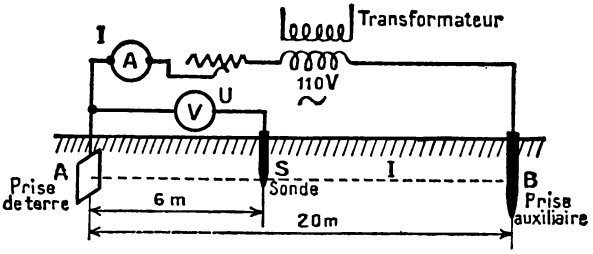


Fig. 2. — Montage pour l'étude de la prise de terre A.

En dérivation entre la prise A et une troisième petite prise S, dite *sonde* de potentiel, enfoncée à peu près dans l'alignement AB, un voltmètre électromagnétique à faible consommation est installé.

Mesurons simultanément :

1° l'intensité I qui passe de A à B dans le conducteur AB et dans le sol;

2° la tension U entre A et S.

Répétons ces mesures en enfonçant la sonde S successivement à des distances de 1, 2,... 19 mètres de la prise A.

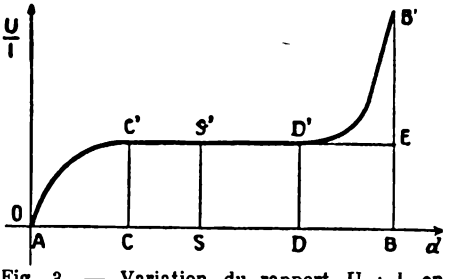


Fig. 3. — Variation du rapport U : I en fonction de la distance *d* de la sonde S à la prise de terre A, quand AB est de l'ordre de 20 mètres.

Traçons la courbe des valeurs du rapport U : I en fonction de la distance AS (fig. 3).

Cette courbe comporte d'abord une région AC' dans laquelle le rapport U : I croît rapidement, puis une partie horizontale C'D' où le rap-

1. Ce transformateur évite la mise directe du réseau à la terre.

port peut être considéré comme constant, enfin une région D'B' où le rapport croît à nouveau.

Faisons varier les conditions de l'expérience :

1° en modifiant l'intensité I sans dépasser 4 ou 5 ampères : la courbe de U : I n'est pas changée;

2° en augmentant la distance AB : la partie horizontale C'D' de la courbe s'allonge sans autre modification;

3° en réduisant la distance AB : la courbe conserve la même forme tant que les deux prises sont à plus d'une dizaine de mètres l'une de l'autre. Si leur distance devient plus faible, la courbe n'a plus de partie horizontale et l'ordonnée BB' diminue un peu (fig. 4).

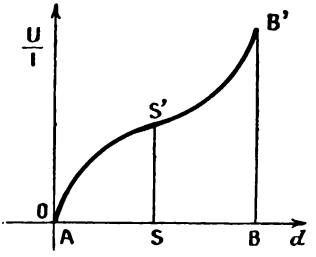


Fig. 4. — Courbe de U : I en fonction de d quand la distance AB est inférieure à 6 mètres.

Conclusion. — Considérons le cas de la figure 3. Le rapport U : I définit une résistance. La valeur la plus grande BB' de cette résistance est la résistance du sol comprise entre les deux prises de terre.

Elle est la somme de la résistance R_A représentée par CC' et de la résistance R_B représentée par EB'. R_A *est la résistance de la prise de terre* A, R_B *la résistance de la prise de terre* B.

Les mesures effectuées ne déterminent ces valeurs que si la sonde S est placée à une distance suffisante de A et de B, au moins six mètres. Les zones plus rapprochées des prises sont des régions de répartition du courant dans le sol.

Si les deux prises A et B sont trop rapprochées, les deux régions de répartition du courant dans la terre empiètent l'une sur l'autre. La résistance entre les deux électrodes est inférieure à la somme des résistances des prises de terre.

La résistance d'une bonne prise de terre est de l'ordre de 10 ohms.

4. — L'expérience qui vient d'être décrite constitue un moyen de mesurer la résistance d'une prise de terre.

On pourra employer cette méthode si l'on dispose d'une distribution d'énergie en courant alternatif, isolée par rapport à la terre. Parce qu'un réseau triphasé a, en général, le neutre à la terre, on montera entre deux phases ou entre le neutre et une phase un petit transformateur monophasé donnant 110 volts au secondaire.

La *prise auxiliaire* sera faite à une vingtaine de mètres de la prise de terre étudiée. On réglera avec un rhéostat l'intensité du courant à environ 3 ampères.

La *sonde* sera enfoncée à mi-distance des *deux* prises, assez profondé-

ment pour éviter qu'elle constitue une résistance exagérée, ce qui diminuerait la tension U lue sur le voltmètre.

On se servira d'un voltmètre n'absorbant que 0,02 ou 0,03 ampère lors de sa déviation maximum. On s'assurera, par une seconde mesure faite après avoir éloigné la sonde d'un ou deux mètres de sa première position, que la tension lue n'est pas sensiblement modifiée.

La résistance d'une prise de terre est ainsi déterminée à 0,02 près.

5. — On mesure aussi la résistance d'une prise de terre en se servant de deux prises auxiliaires.

L'appareil de mesure employé est un pont à fil alimenté en courant alternatif par un vibrateur. L'équilibre du pont est constaté avec un récepteur téléphonique (fig. 5).

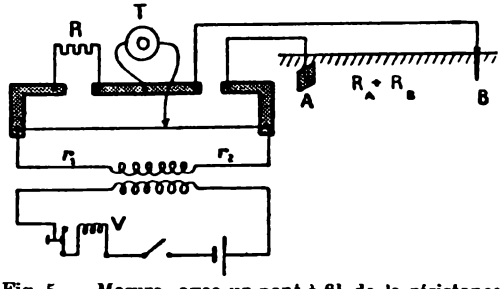


Fig. 5. — Mesure, avec un pont à fil, de la résistance entre les prises de terre A et B.

A une vingtaine de mètres de la prise A dont on veut mesurer la résistance R_A, on installe des prises auxiliaires B de résistance inconnue R_B et C de résistance inconnue R_C. La distance entre B et C est aussi d'une vingtaine de mètres.

En plaçant le pont à fil entre A et B, on mesure

$$R_A + R_B = a \qquad (1)$$

entre A et C

$$R_A + R_C = b \qquad (2)$$

entre B et C

$$R_B + R_C = c \qquad (3)$$

Additionnons les trois relations membre à membre :

$$R + R_B + R_C = \frac{a + b + c}{2} \qquad (4)$$

Soustrayons membre à membre (3) de (4) :

$$R_A = \frac{a + b - c}{2}$$

Cette méthode est peu précise : alors que l'erreur sur l'une des mesures est de l'ordre de 0,02, le résultat final peut n'être déterminé qu'à 0,1 près. Elle a l'avantage de ne pas exiger de matériel spécial.

6. — La résistance des prises de terre se mesure commodément avec des ohmmètres construits pour cet usage.

Les modèles de ces ohmmètres sont nombreux. Nous indiquerons seulement le principe de deux d'entre eux.

Essayeur de terres Megger. — Puisque la résistance à mesurer R_t peut s'obtenir par le quotient d'une tension par une intensité, on recourt à un logomètre. Pour que cet appareil soit très sensible, il est construit pour fonctionner avec du courant continu.

L'ohmmètre Megger comprend donc une magnéto à courant continu (fig. 6). Le courant qu'elle fournit traverse l'un des cadres du logomètre. Il est ensuite rendu alternatif par un commutateur tournant solidaire de l'axe de la magnéto, puis passe de la prise de terre principale à la prise auxiliaire B. Le courant dans le cadre est donc proportionnel au courant alternatif I_1 dans le sol.

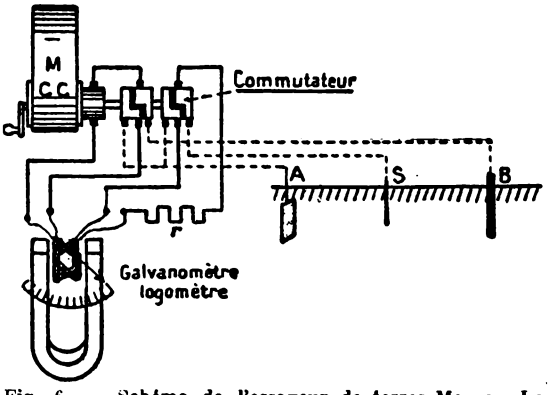


Fig. 6. — Schéma de l'essayeur de terres Megger. Le courant qui circule dans les conducteurs en pointillé est alternatif, il est continu dans les autres.

Un courant dérivé pris sur l'électrode principale A et sur la sonde S est redressé par un second commutateur tournant. Il traverse le second cadre du logomètre en série avec une résistance *r*. Le courant dans le cadre est donc proportionnel à U, tension entre A et S.

La déviation du système de cadres perpendiculaires dépend ainsi du quotient U : I. Cette déviation est repérée par une aiguille sur un cadran gradué en ohms.

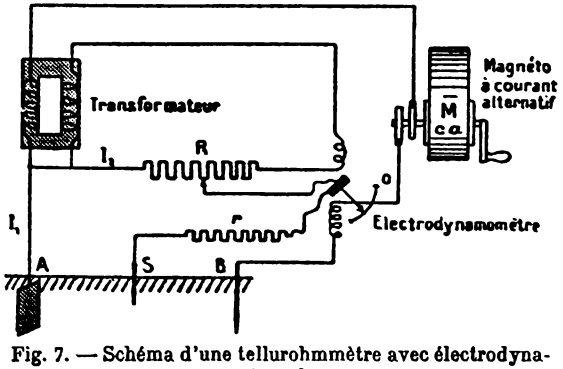


Fig. 7. — Schéma d'une tellurohmmètre avec électrodynamomètre de zéro.

Un dispositif de shuntage du cadre intensité donne à l'instrument deux gammes de mesures : 0 à 30 ohms et 0 à 150 ohms.

On remarquera que le galvanomètre quotientmètre rend les mesures indépendan-

tes de la tension fournie par la magnéto et par suite de la vitesse avec laquelle on tourne la manivelle de l'appareil.

Tellurohmmètres. — Ces appareils comportent deux circuits différents : l'un comprend le sol entre la prise de terre principale A et la prise auxiliaire B (fig. 7), l'autre une résistance de comparaison R. Ces deux circuits sont parcourus par des courants alternatifs I_1 et I_2 dont les intensités sont égales. On obtient ces deux courants avec un transformateur de rapport 1/1.

Le primaire est traversé par le courant I_1 fourni par une magnéto M à courant alternatif. Ce courant passe dans le sol entre A et B. Il produit entre la prise A et la sonde S, une tension $R_A I_1$, en désignant par R_A la résistance à mesurer.

Sur la résistance graduée R, on règle la position d'un curseur de manière à opposer à $R_A I_1$ une tension égale RI_2. Un électrodynamomètre de zéro, en série avec une résistance *r* permet de constater l'égalité des deux tensions.

Quand $R_A I_1 = RI_2$, $R_A = R$ puisque $I_1 = I_2$.

A un électrodynamomètre, certains constructeurs préfèrent un galvanomètre à aimant fixe et cadre mobile beaucoup plus sensible. Un commutateur tournant calé sur l'arbre de la magnéto redresse alors le courant dans l'appareil de zéro.

Applications.

A. — Mesure de la résistance d'une prise de terre avec un ampèremètre et un voltmètre.

C'est la réalisation de l'expérience des paragraphes 3 et 4.

B. — Mesure de la résistance d'une prise de terre avec deux prises auxiliaires et un pont à fil.

La résistance étalonnée de comparaison sera choisie de 10 à 20 ohms.

C. — Mesure avec un essayeur de terres.

Il sera intéressant d'appliquer successivement ces trois méthodes à la mesure de la résistance de la même prise de terre. La comparaison des résultats obtenus montrera la précision de telles mesures.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un transformateur 220-110 V, 500 VA.
Un ampèremètre électromagnétique 5A.
Un voltmètre électromagnétique 75 V.
Un rhéostat 10 Ω, 5 A.
Un pont à fil avec vibrateur et récepteur téléphonique.
Une résistance étalonnée (boîte à fiches), de 10 à 20 ohms.
Un essayeur de terres.

Étalonnage d'un voltmètre ou d'un ampèremètre avec un potentiomètre.

1. — Avec un potentiomètre, on mesure une f. é. m. ou une d. d. p. sans qu'elles débitent un courant, par la méthode dite d'opposition.

Soit à mesurer la f. é. m. e d'une pile.

1° On constitue deux circuits (fig. 1). L'un APCBA comporte une source de courant P qui débite dans deux résistances en série r et r' que l'on peut faire varier en laissant constante leur somme $r + r'$. L'autre AeGBA comprend la pile dont on veut mesurer la f. é. m. e, montée *en opposition* avec la source P et un galvanomètre de zéro G.

On détermine par tâtonnement la résistance r pour laquelle aucun courant ne passe dans le galvanomètre.

En désignant par I le courant dans les résistances ABC :

$$e = r\,I \qquad (1)$$

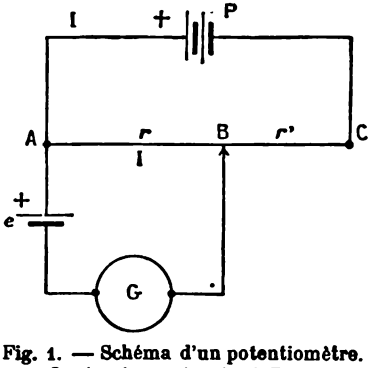


Fig. 1. — Schéma d'un potentiomètre. — La tension entre A et B est une fraction réglable à volonté de la tension entre A et C. — La résistance entre ces deux points constitue le *potentiomètre* proprement dit.

2° On remplace la pile e par une pile étalon de f. é. m. E et l'on détermine la nouvelle résistance r_1 pour laquelle le galvanomètre G reste au zéro :

$$E = r_1\,I \qquad (2)$$

En éliminant I dans les relations (1) et (2) :

$$e = E \times \frac{r}{r_1}$$

Il est indispensable que le courant I *soit le même dans les deux phases de l'opération.* C'est pourquoi il faut que la résistance ABC garde la même

valeur et que la f. é. m. de la source P ne change pas. On utilisera une batterie d'accumulateurs qui ne soit ni trop déchargée ni trop nouvellement chargée. Évidemment, sa f. é. m. doit être supérieure à celle que l'on veut mesurer.

2. — Deux boîtes identiques de résistances étalonnées à fiches suffisent pour monter un potentiomètre.

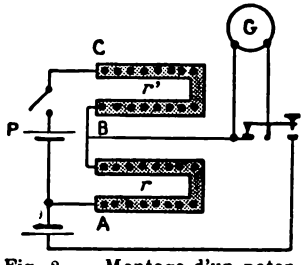


Fig. 2. — Montage d'un potentiomètre avec deux boîtes de résistances.

Les constructeurs d'appareils de mesures électriques fabriquent des potentiomètres d'emploi commode.

A défaut, avec deux boîtes de résistances à fiches de chacune 16 bobines de résistance totale 11 110 ohms, on peut monter un potentiomètre précis.

Les deux boîtes sont connectées en série comme l'indique la figure 2. Toutes les fiches de l'une r' sont enlevées. La résistance de l'ensemble est donc 11 110 ohms. Aux bornes des deux boîtes on branche, en série, une batterie P de 2 éléments et un interrupteur.

La pile étalon ou la f. é. m. à mesurer sont montées entre la borne A et la borne B avec, en série, un galvanomètre Deprez-d'Arsonval et une clef Morse.

3. — Étalonnons le potentiomètre.

Montons un élément Daniell étalon (1,07 volt), entre les bornes A et B (fig. 2).

Nous nous proposons de déterminer la valeur de la résistance r qu'il faut entre A et B pour qu'aucun courant ne passe dans le galvanomètre.

Shuntons le galvanomètre pour ne pas le détériorer pendant les tâtonnements.

Donnons d'abord à r la valeur 5 000 ohms en transportant la fiche correspondante de la boîte r à la boîte r'. Appuyons sur les deux clefs : le galvanomètre dévie, par exemple, à droite.

Essayons la valeur 7 000 ohms. Le galvanomètre dévie à gauche. La résistance cherchée est donc comprise entre 5 000 et 7 000 ohms.

Resserrons méthodiquement les deux branches de cette « fourchette » en procédant comme nous l'avons indiqué pour l'emploi de la boîte à pont. Nous supprimerons le shunt du galvanomètre quand nous ferons varier r par dizaines d'ohms seulement.

Finalement, nous obtenons la valeur de r à 1 ohm près. Il est possible d'apprécier les dixièmes d'ohm en tenant compte des déviations du galvanomètre pour 1 ohm en plus ou en moins. On trouve $r = 5\,463{,}2$ ohms.

Donc, 1 ohm correspond à une chute de tension de $\frac{1,07}{5463,2}$ entre A et B.

4. — Mesurons la f. é. m. d'un élément Leclanché.

Effectuons une seconde mesure en remplaçant l'étalon Daniell par un élément Leclanché. Nous trouvons $r_1 = 7\,772$ ohms.

Donc : $$e = \frac{1,07}{5\,463,2} \times 7\,772 \text{ volts.}$$
$$= 1,522 \text{ volt}$$

Remarque. — Pour ne pas détériorer les boîtes de résistances étalonnées, on limite l'intensité normale qui les traverse à 0,001 ampère. La résistance du potentiomètre tel que nous l'avons décrit est 11 110 ohms, la tension admissible à ses bornes est donc 11 volts, donnée par 5 éléments d'accumulateurs au maximum. La plus grande tension qu'il est possible de mesurer entre A et B est environ 10 volts [1].

5. — Un autre mode d'étalonnage du potentiomètre rend plus faciles les calculs résultant de l'emploi de l'appareil.

Proposons-nous, par exemple, de faire en sorte qu'à chaque ohm de la résistance du potentiomètre corresponde une tension de 1 : 3 000 volt; ou, ce qui revient au même, que l'intensité dans le potentiomètre soit 1 : 3 000 ampère.

Branchons en série l'élément étalon Daniell avec le galvanomètre entre les bornes A et B. Sa f. é. m., 1,07 volt, doit correspondre à

$1,07 : \frac{1}{3000} = 3210$ ohms de la résistance r.

Donnons cette valeur à r. Mettons en série avec la batterie P, qui comprendra 2 éléments d'accumulateurs, une résistance de réglage R. Réglons R pour que le galvanomètre reste au zéro (fig. 3).

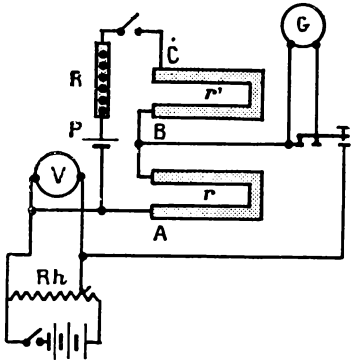


Fig. 3. — Étalonnage d'un voltmètre 0-3 volts.

Le potentiomètre est alors prêt pour mesurer une f. é. m. dont la plus grande valeur est :

$$\frac{1}{3\,000} \times 11\,110 \simeq 3,5 \text{ volts.}$$

Pour limiter les tâtonnements dans le réglage, calculons l'ordre de grandeur de cette résistance R.

1. Pour monter le potentiomètre, à défaut de deux boîtes de 16 résistances, on pourra utiliser les résistances de réglage de deux boîtes à pont.

La f. é. m. de la batterie P est environ 4 volts, l'intensité dans le circuit 1 : 3 000 ampère, la résistance totale du circuit (11 110 + R) ohms; donc en appliquant la loi d'Ohm :

$$\frac{1}{3\,000} = \frac{4}{11\,110 + R}$$

$$R = 890 \text{ ohms.}$$

Une troisième boîte de résistances à fiches de 12 bobines, 1 110 ohms, sera nécessaire pour constituer cette résistance.

Applications.

Avec un potentiomètre et un étalon de force électromotrice, on étalonne avec précision voltmètres et ampèremètres.

A. — Étalonnage d'un voltmètre pour une tension inférieure à 10 volts.

Soit à étalonner un voltmètre 0-3 volts, 150 divisions.

Le potentiomètre est réglé pour 1 : 3 000 volt par ohm.

Entre les bornes A et B, en série avec le galvanomètre, nous montons un rhéostat potentiométrique R*h* alimenté avec une batterie de 4 volts. Le voltmètre V est placé aussi en dérivation entre A et B (fig. 3).

Pour une dizaine de valeurs de la tension, obtenues en déplaçant le curseur sur le rhéostat, nous relevons les indications du voltmètre et notons la résistance *r* du potentiomètre correspondante.

Lectures et calculs sont consignés dans le tableau suivant :

ÉTALONNAGE DU VOLTMÈTRE N° .....
Sensibilité : 3 VOLTS.
Échelle : 150 DIVISIONS.

LECTURES		CALCULS		
Voltmètre *a*	Potentiomètre *r*	Tension mesurée au potentiomètre $U = r : 3\,000$	Tension indiquée par le voltmètre $U_1 = a \times 0{,}02$	Corrections $U - U_1$
1	2	3	4	5

B. — Étalonnage d'un voltmètre pour une tension supérieure à 10 volts.

Soit à étalonner un voltmètre 0-150 volts.

Le potentiomètre est réglé pour 1 : 2 000 de volt par ohm (fig. 4).

Nous disposons d'un rhéostat potentiométrique R*h* et d'une source de courant capable de fournir 150 volts aux bornes du voltmètre.

Entre ces bornes du voltmètre nous montons deux résistances en série, l'une de 300 ohms, l'autre de 8 700 ohms : la tension entre les extrémités de la résistance de 300 ohms est toujours le 1 : 30 de la tension aux bornes du voltmètre.

C'est cette tension réduite que nous plaçons aux bornes A et B du potentiomètre pour la mesurer.

C. — Étalonnage d'un ampèremètre, par exemple de 0-30 ampères.

La méthode consiste à faire passer un courant I à la fois dans l'ampèremètre et dans une résistance étalonnée R, à mesurer au potentiomètre la chute de tension dans la résistance, ce qui permet de calculer I; puis, à comparer cette valeur à l'indication de l'ampèremètre.

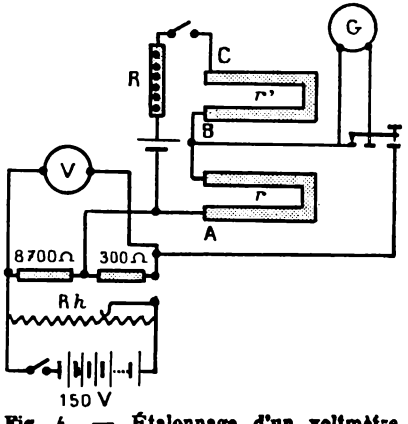


Fig. 4. — Étalonnage d'un voltmètre 0-150 volts.

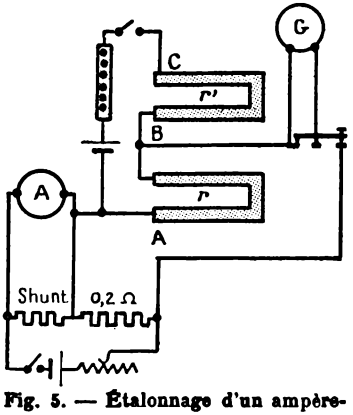


Fig. 5. — Étalonnage d'un ampèremètre 0-30 ampères.

Pour rester dans les limites d'emploi du potentiomètre, la résistance R doit donner à ses bornes une tension de 3 à 10 volts quand elle est traversée par 30 ampères : une résistance de 0,2 ohm conviendra.

Un seul élément d'accumulateur pouvant fournir 30 ampères l'alimentera, le courant sera réglé avec un rhéostat de 10 ohms à 8 ou 10 plots.

Le potentiomètre, avec une batterie de 3 éléments, sera réglé à 1 : 2 000 volt par ohm (fig. 5).

On fera 5 ou 6 séries de mesures.

Dans un tableau du modèle ci-dessous, on inscrira les lectures et les calculs.

ÉTALONNAGE DE L'AMPÈREMÈTRE N° .....
Sensibilité : 0-30 AMPÈRES
Échelle : 100 DIVISIONS.

LECTURES		CALCULS			
Ampèremètre	Résistance r du potentiomètre	Tension au potentiomètre $U = r : 2\,000$	Intensité calculée $I = U : 0{,}2$	Intensité I' indiquée par l'ampèremètre	Corrections I–I'
1	2	3	4	5	6

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Deux boîtes de résistances à fiches de 11 110 ohms.
Deux boîtes de 1 110 ohms.
Une boîte de 410 ohms.
Un rhéostat potentiométrique de 10 Ω, 1 ampère.
Un réhostat potentiométrique de 150 Ω, 1 ampère.
Une résistance étalonnée 0,2 Ω, 30 ampères.
Deux manipulateurs Morse.
Un galvanomètre.

Étalonnage d'un wattmètre monophasé.

Vous savez qu'il existe des wattmètres électrodynamiques, des ferrodynamiques et des wattmètres à induction.

On étalonne les électrodynamiques et les ferrodynamiques avec du courant continu. Les wattmètres à induction ne fonctionnant pas avec du courant continu, on se sert pour les étalonner de courant alternatif et on les compare à un bon appareil électrodynamique.

1. — Principe de l'étalonnage en courant continu.

Supposons qu'il s'agisse d'un wattmètre 10 ampères, 300 volts.

On utilise deux sources de courant continu, l'une capable de fournir une faible intensité et une tension de 300 volts, l'autre pouvant débiter 10 ampères à une tension de 2 volts (fig. 1).

On applique aux bornes du circuit *volts* du wattmètre une tension voisine de 300 volts, qu'on ne modifie pas pendant tout l'étalonnage, mais dont on mesure la valeur U, à chaque opération, avec un voltmètre étalonné.

Dans la bobine *ampères* on fait passer un courant I auquel on donne successivement plusieurs valeurs comprises entre 0 et 10 ampères, mesurées avec un ampèremètre étalonné.

Pour deux valeurs simultanées U et I, le wattmètre devrait indiquer P = UI watts. Son aiguille marque W watts. La correction à apporter à la lecture du wattmètre consiste donc à y ajouter algébriquement P — W.

L'étalonnage a pour but de déterminer cette correction pour un certain nombre de points de l'échelle de l'appareil.

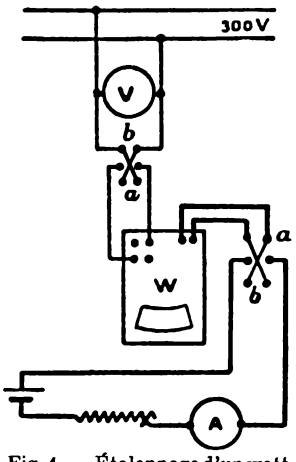


Fig. 1. — Étalonnage d'un wattmètre en puissance fictive.

N'oubliez pas qu'un wattmètre électrodynamique, comme tous les appareils électrodynamiques, est un peu influencé par le champ magné-

tique terrestre. Deux séries de mesures seront donc nécessaires, en intervertissant de l'une à l'autre le sens du courant *dans les deux bobines*.

2. — Dispositif expérimental.

Le schéma est celui de la figure 1.

Sur le circuit *tension*, aucun appareil de réglage n'est nécessaire. On y monte un voltmètre et, après le voltmètre, un petit inverseur bipolaire.

Sur le circuit *intensité*, on met en série, avec un ou deux éléments d'accumulateurs, un rhéostat de réglage 0-10 ampères, un ampèremètre et un inverseur bipolaire.

3. — Lectures et calculs.

Repérons d'abord les positions simultanées, *a* et *b*, des inverseurs d'intensité et de tension, pour lesquelles l'aiguille du wattmètre dévie dans le sens convenable.

Pour un plot déterminé du rhéostat de réglage, nous plaçons les inverseurs dans la position *a* et nous notons les indications du voltmètre, de l'ampèremètre et du wattmètre. Puis nous mettons les inverseurs dans la position *b* et nous recommençons les lectures.

Si les sources de courant employées sont suffisamment stables, les indications du voltmètre et de l'ampèremètre restent les mêmes dans les deux cas.

Nous effectuons ainsi une dizaine de ces doubles mesures pour des valeurs de l'intensité comprises entre 0 et 10 ampères.

Les lectures sont inscrites dans un tableau comme ci-dessous.

Pour déterminer les valeurs de U et de I, il sera tenu compte des corrections d'étalonnage.

En ce qui concerne le wattmètre, quand on utilise la sensibilité de tension U et la sensibilité d'intensité I, la déviation de toute l'échelle correspond à la puissance UI. En l'espèce, les 150 divisions de l'échelle correspondent à 300 × 10 = 3 000 watts, chaque division vaut donc 20 watts.

Étalonnage du wattmètre n°..., 10A, 300V, échelle : 150 divisions.
Ampèremètre n°..., échelle 100 divisions, shunt 10A.
Voltmètre n°..., échelle 150 divisions, sensibilité 300V.

Numéros des mesures	LECTURES			CALCULS						
	Voltmètre	Ampèremètre	Wattmètre	U	I	P = UI	W_a	W_b	$W = \frac{W_a + W_b}{2}$	P-W
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 a	290	8	12	291	0,82	238,6	240			
1 b	290	8	11,8					236	238	+0,6
2 a										
2 b										

4. — Résultats.

1° Dans le cas où la tension U et l'intensité I restent invariables[1] pendant la mesure de deux valeurs correspondantes W_a et W_b, la puissance UI est la même dans les deux positions des inverseurs de tension et de courant. Nous calculons l'indication moyenne du wattmètre $W = \frac{W_a + W_b}{2}$ et la correction P — W à ajouter algébriquement aux lectures au wattmètre. Ces corrections pour une dizaine de points de l'échelle suffisent pratiquement.

2° Souvent P et W sont proportionnels. On effectue alors la correction des lectures wattmétriques en les multipliant par le facteur constant $k = \frac{P}{W}$.

3° Dans le cas où les f. é. m. des sources de courant dont on se sert pour l'étalonnage sont peu stables, ce qui se produit avec des dynamos de faible puissance, il est préférable de modifier un peu la façon d'opérer.

Les commutateurs étant dans les positions *a*, on effectue une série de mesures pour une dizaine de valeurs de I_a comprises entre 0 et 10 ampères. On en tire les valeurs correspondantes de P_a et de W_a. On procède de même en plaçant les commutateurs dans les positions *b*.

Sur du papier millimétrique, on trace, avec les mêmes coordonnées, la courbe de W_a en fonction de P_a et celle de W_b en fonction de P_b. Avec ces deux courbes on détermine la courbe $W = \frac{W_a + W_b}{2}$ qui sert à établir les corrections P — W à ajouter algébriquement à un certain nombre de valeurs de l'échelle wattmétrique, ou plutôt, si la courbe W est à peu près une droite, le facteur constant de correction P : W.

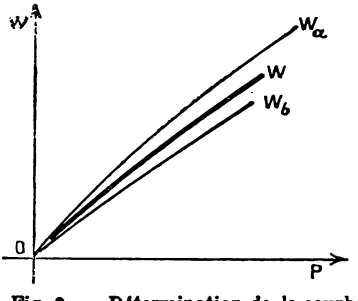


Fig. 2. — Détermination de la courbe de W en fonction de P. (L'écartement de W_a et de W_b a été exagéré.)

Matériel nécessaire à la manipulation.

Un ampèremètre de contrôle à courant continu 0-10 ampères, récemment étalonné.
Un voltmètre de contrôle à courant continu 0-130 volts, récemment étalonné.
Un wattmètre.
Une batterie de 1 ou 2 éléments d'accumulateurs pouvant débiter 10 ampères.
Une source de courant continu de 300 volts environ.
Un rhéostat 2 ohms, 10 ampères.
Deux inverseurs bipolaires.

1. On obtient cette constance quand on emploie comme générateurs de tension et de courant des batteries d'accumulateurs à demi déchargées.

Étalonnage d'un compteur de courant continu.

A. — Compteur ampèreheuremètre.

1. — Un type souvent employé est le compteur O'K.

C'est un petit moteur magnéto-électrique, à induit sans fer, qui tourne à vide sous l'action d'une dérivation du courant de la ligne (fig. 1).

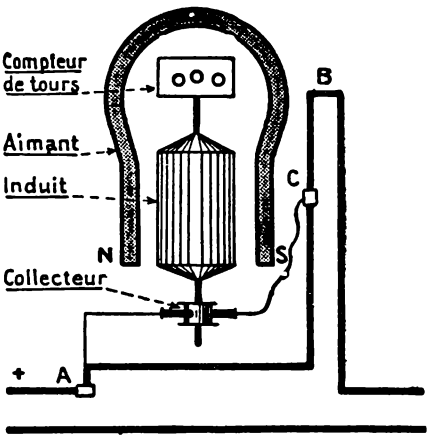


Fig. 1. — Schéma d'un compteur O'K. Le conducteur AC est un shunt réglable au moyen du curseur C.

La théorie de l'appareil est étudiée dans le cours d'électricité [1]. On démontre que le nombre de tours de l'induit est proportionnel à la quantité d'électricité qui traverse le compteur et la ligne. La vitesse de l'induit est relativement grande (3 à 4 tours par seconde).

2. — Examinons la plaque signalétique et le cadran de l'appareil.

La plaque, comme celle de tous les compteurs, porte réglementairement (fig. 2) :

1° le nom et l'adresse du constructeur;

2° la désignation du type : Compteur ampèreheuremètre;

3° la date de l'arrêté ministériel d'approbation du modèle;

4° la limite maximum du courant : 3A, et la tension normale : 225V, pour lesquelles est construit l'instrument;

1. *Électricité industrielle, Machines électriques :* 30e leçon.

5° la constante de l'appareil : K = 0,05 Wh, c'est-à-dire l'énergie enregistrée par tour de l'induit;

6° le lieu de fabrication du compteur.

Sur le cadran (fig. 3), six petits cercles, munis chacun d'une aiguille centrale, sont gradués de 0 à 10. Les deux cercles de droite, qui portent des aiguilles rouges, sont marqués 0,01 et 0,1; ils ne sont utiles que pour l'étalonnage du compteur. Les autres, marqués 1, 10, 100, 1 000, servent pour le relevé mensuel de la consommation en service normal.

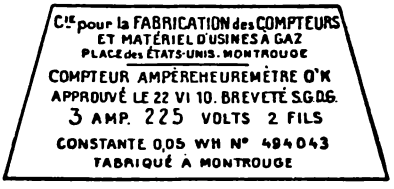


Fig. 2. — Plaque signalétique d'un compteur O'K.

L'indication *hWh* signifie que l'appareil est gradué en hectowatt-heures. Ainsi le mécanisme électrique du compteur enregistre des ampèreheures, mais le cadran marque des hectowattheures. Les deux grandeurs sont proportionnelles si la tension de la distribution est constante.

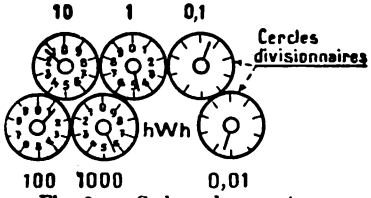


Fig. 3. — Cadran de compteur.

A la partie inférieure de l'appareil, quatre bornes de branchement sont fixées dans le socle. Les deux médianes sont réunies entre elles. Aux deux bornes de gauche, dites « bornes secteur », arrivent les fils de ligne. Des deux bornes de droite, dites « bornes abonné », partent les deux conducteurs de l'installation (fig. 4). Dans le branchement des fils de ligne, il est nécessaire de tenir compte du sens de la polarité pour que l'induit et les aiguilles de la minuterie tournent dans le sens convenable.

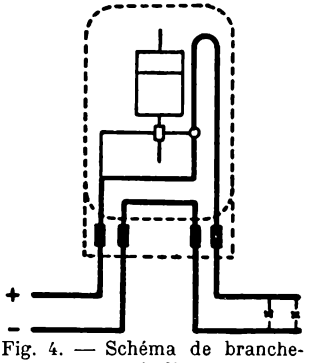


Fig. 4. — Schéma de branchement normal d'un compteur O'K.

3. — Vérification du compteur au laboratoire.

Soit à vérifier un compteur O'K, 3 ampères, 225 volts.

L'opération consiste à faire traverser l'appareil par une quantité d'électricité que l'on mesure avec un ampèremètre étalonné et un chronoscope ($Q = I\,t$), et à comparer le résultat trouvé avec le nombre enregistré par la minuterie du compteur.

Montage. — On place en série avec le compteur un élément d'accumulateur capable de débiter 3 ampères, un rhéostat et un ampèremètre 0-5 ampères récemment étalonné (fig. 5).

Vérification au grand débit. — L'intensité est réglée à 3 ampères environ. On fait tourner le compteur pendant une vingtaine de minutes pour que l'enroulement de l'induit atteigne sa température de régime.

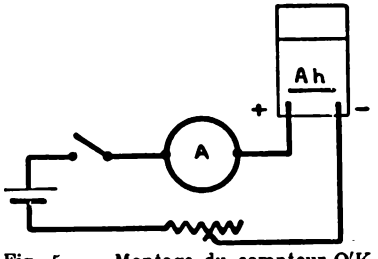


Fig. 5. — Montage du compteur O'K pour vérification au laboratoire.

Lectures. — A l'instant où l'aiguille rouge du cercle marqué 0,01 passe devant une division principale, on met en marche un chronoscope. On arrête le chronoscope quand l'aiguille repasse à la position de départ. Pendant la brève durée de la mesure, on lit l'indication de l'ampèremètre qui n'a pas le temps de varier.

On obtient ainsi la valeur I de l'intensité dans le compteur et le temps t qu'il a fallu pour que l'appareil enregistre 10 fois 0,01 hectowattheure, soit 10 wattheures ou $3\,600 \times 10 = 36\,000$ joules.

Par exemple, $I = 3$ ampères, $t = 52{,}6$ secondes.

Calculs. — La quantité d'électricité qui a traversé le compteur est It coulombs.

La quantité enregistrée est 36 000 : U, U étant la tension nominale du compteur.

L'*erreur absolue* de la mesure est donc :

$$\left(\frac{36\,000}{U} - It\right) \text{ coulombs}$$

et *l'erreur relative :*

$$e = \left(\frac{36\,000}{U} - It\right) : It = \frac{36\,000}{U\,I\,t} - 1$$

Avec les valeurs numériques $U = 225$ volts, $I = 3$ ampères et $t = 52{,}6$ secondes

$$e = + 0{,}0139$$

Le compteur marque un peu trop, mais l'erreur, très inférieure à la limite réglementaire 0,03, est tolérable.

Vérification au petit débit. — On règle l'intensité au dixième de la valeur nominale, soit 0,3 ampère. Le compteur tourne lentement, sa vitesse de rotation est 10 fois plus faible que dans la mesure précédente.

Lectures. — Pour que la mesure soit rapide, au lieu de se servir des cercles divisionnaires du cadran, on trace un repère sur l'induit et l'on mesure le temps t nécessaire pour que cet induit fasse n tours, n étant compris entre 10 et 20[1].

On peut admettre que l'intensité I dans le compteur ne varie pas pendant le temps t.

Par exemple, quand I = 0,3 ampère, on a compté n = 12 tours et mesuré t = 32,8 secondes.

Calculs. — La quantité d'électricité qui a traversé le compteur est I t coulombs.

Le compteur, dont la constante est K, a enregistré Kn wattheures correspondant sous la tension U à (3 600 K n : U) coulombs.

L'*erreur absolue* de la mesure est

$$[(3\,600\ \mathrm{K}\ n : \mathrm{U}) - \mathrm{I}\ t] \text{ coulombs,}$$

et l'*erreur relative*

$$e = [(3\,600\ \mathrm{K}n : \mathrm{U}) - \mathrm{I}t] : \mathrm{I}\ t = \frac{3\,600\ \mathrm{K}n}{\mathrm{U}\ \mathrm{I}\ t} - 1$$

Dans le cas des valeurs numériques U = 225 volts, I = 0,3 ampère, t = 32,8 secondes, K = 0,05 wattheure, n = 12 tours :

$$e = -\ 0{,}0225$$

Le compteur retarde, mais l'erreur reste dans les limites réglementaires.

4. — La méthode de vérification doit être un peu modifiée si l'on ne dispose que d'une montre ordinaire à secondes.

Un chronoscope permet de mesurer les dixièmes de seconde; avec une montre ordinaire à secondes, on ne peut mesurer qu'un nombre entier de secondes. Pour que le temps soit évalué avec la même précision relative, il faut qu'il soit dix fois plus grand quand on emploie une montre au lieu d'un chronoscope.

Donc, pour vérifier le compteur au grand débit, on mesurera le temps mis par l'aiguille du cercle marqué 0,1 pour faire un tour complet. Pour la vérification au petit débit, on mesurera le temps nécessaire à l'aiguille du cercle divisionnaire 0,01 pour faire un tour complet.

Mais, dans les deux cas, la mesure dure plusieurs minutes et l'intensité du courant risque de varier pendant ce temps. Un second observateur relèvera toutes les minutes les indications de l'ampèremètre : on prendra comme valeur de I la moyenne arithmétique des intensités lues.

5. — La vérification d'un compteur en service chez un abonné s'effectue de la même façon.

1. Pour cette valeur de n, l'erreur relative dans la mesure de t est acceptable et l'expérience est assez brève.

On branche un ampèremètre étalonné à la place de l'un des fusibles à la sortie du compteur (fig. 6). On allume, chez l'abonné, un nombre suffisant de lampes pour obtenir d'abord le grand débit, ensuite le petit débit. Pour ne pas enlever les plombs du carter du compteur, on se sert, dans les deux mesures, des cercles divisionnaires du cadran.

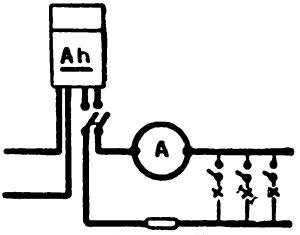


Fig. 6. — Montage d'un ampèremètre pour vérification d'un compteur O'K chez un abonné.

6. — Réglage du compteur.

Au grand débit, si le compteur marque trop peu, on déplace le curseur mobile du shunt vers le point B (fig. 1), pour augmenter l'intensité du courant dans l'induit.

Dans le cas contraire, on rapproche le curseur de A.

Un nouvel étalonnage est évidemment nécessaire après ce réglage.

Il n'y a pas de mécanisme de réglage *au faible débit*. L'erreur est du même ordre de grandeur qu'au débit normal si le compteur est en bon état mécanique. Quand elle est trop importante, il faut nettoyer et examiner le pivot et la crapaudine qui supportent l'induit : s'ils sont détériorés, l'appareil est hors service.

B. — Compteur wattheuremètre.

7. — Le compteur Thomson est un petit moteur à courant continu, sans fer, énergiquement freiné.

L'inducteur est en série sur la ligne, l'induit est en dérivation sur les deux fils de la distribution, le moteur est freiné par les courants de Foucault induits dans un disque d'aluminium calé sur l'axe du moteur et qui tourne entre les pôles d'aimants permanents (fig. 7).

Une petite bobine en série avec l'induit, avec

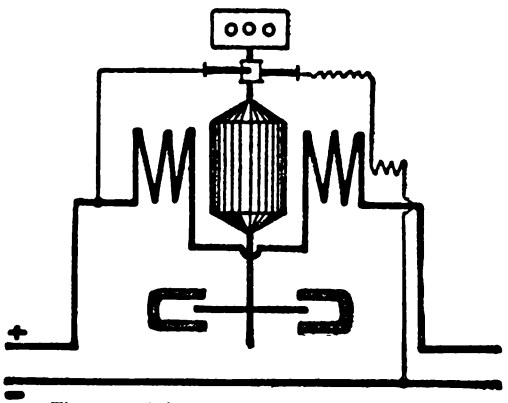


Fig. 7. — Schéma d'un compteur Thomson.

un noyau réglable constitué par un fil de fer, est disposée à l'intérieur de l'une des bobines inductrices. Elle sert à compenser les frottements et assure le démarrage aux très faibles charges.

On démontre [1] que le nombre de tours de l'induit est proportionnel à l'énergie consommée dans l'installation.

La plaque signalétique de l'appareil porte les mêmes rubriques réglementaires que celle du compteur O'K. Nous y lisons que le maximum du courant à admettre dans l'instrument « modèle B » que nous allons vérifier est 3 ampères, celui de la tension 220 volts et que la constante, c'est-à-dire l'énergie enregistrée par tour de l'induit est K = 0,2 W*h*.

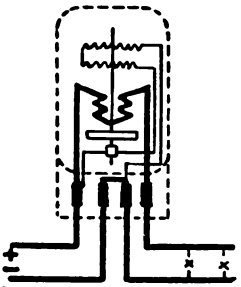


Fig. 8. — Schéma de branchement d'un compteur Thomson.

Le cadran porte six cercles dont les deux premiers à droite marqués 0,01 et 0,1 ne servent que pour l'étalonnage. L'indication *h* W *h* signifie que la minuterie enregistre des hectowattheures.

Le compteur est muni de quatre bornes. Aux deux extrêmes sont connectés les inducteurs. Les deux médianes sont réunies ensemble. Le circuit de l'induit est branché entre l'une d'elles et l'une des bornes inductrices; une partie de la résistance additionnelle qu'il comporte est en manganine pour atténuer l'influence de la température sur la résistance de l'induit.

Le schéma de montage normal du compteur est celui de la figure 8.

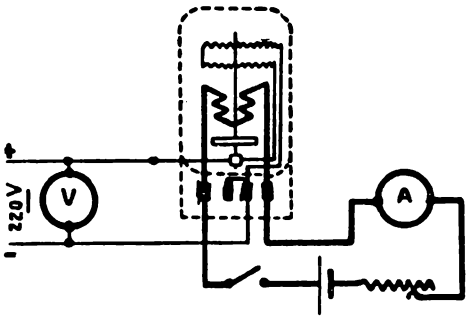


Fig. 9. — Montage d'un compteur Thomson pour vérification avec une puissance fictive au laboratoire.

8. — Au laboratoire, le compteur est vérifié commodément avec une puissance fictive.

La vérification consiste à faire traverser le compteur par une énergie W = U I *t* que l'on mesure avec un voltmètre, un ampèremètre et un chronomètre, à relever la quantité W, enregistrée par l'instrument et à comparer W et W$_e$.

1. *Électricité Industrielle, Machines électriques* : page 268.

Montage. — On sépare le circuit à fil fin de l'induit et le circuit à gros fil des inducteurs (fig. 9).

Le premier, avec un voltmètre étalonné en dérivation, est monté aux bornes d'une source de courant capable de fournir la tension nominale du compteur sous un faible débit. Le second est branché sur un élément d'accumulateur qui peut donner l'intensité maximum admise par le compteur; un rhéostat et un ampèremètre étalonné sont en série.

L'induit porte un trait blanc, visible quand il passe derrière une fenêtre ménagée dans le carter de l'appareil. On peut ainsi compter le nombre de tours que fait l'induit pendant un temps déterminé.

Vérification au grand débit. — Le rhéostat est réglé pour obtenir le courant maximum, soit 3 ampères. On laisse tourner le compteur pendant une vingtaine de minutes pour que ses enroulements atteignent une température stable.

Lectures. — Deux observateurs A et B sont nécessaires pour effectuer simultanément les quatre mesures correspondantes.

A observe l'induit. Lorsque le repère blanc passe derrière la fenêtre du carter, il met le chronoscope en marche et, pendant 30 à 60 secondes, compte n tours de l'induit, puis arrête le chronoscope. Il a mesuré ainsi la durée t des n tours de l'induit.

Pendant ce temps, B a relevé les indications U du voltmètre et I de l'ampèremètre.

Par exemple, on a trouvé pour $n = 30$ tours, $t = 32{,}6$ secondes, $U = 224$ volts et $I = 3$ ampères.

Calculs. — L'énergie fictive fournie au compteur pendant le temps t est

$$W = U\,I\,t \text{ joules.}$$

L'appareil a enregistré $W_e = K n$ wattheures, soit

$$W_e = 3\,600\ K n \text{ joules.}$$

L'*erreur absolue* de la mesure est

$$W_e - W = 3\,600\ K\ n - UIt$$

et *l'erreur relative*

$$e = (3\,600\ K\ n - UI\ t) : UIt$$

$$= \frac{3\,600\ K\ n}{UI\ t} - 1$$

Avec les valeurs numériques relevées :

$$e = -0{,}014.$$

Le compteur étudié retarde un peu, toutefois son réglage est satisfaisant.

Vérification au faible débit. — On effectue aussi, comme il vient d'être indiqué, la vérification du compteur à demi-charge ($I = 1{,}5$ A).

Au dixième de charge (I = 0,3 A), parce que la rotation de l'induit est lente, on préfère parfois mesurer le temps mis pour faire un tour par l'aiguille du cercle divisionnaire marqué 0,01.

9. — Quelques modifications doivent être apportées aux opérations de vérification qui viennent d'être décrites :

1° *dans le cas d'un compteur à vérifier en place chez un abonné.*

L'ampèremètre et le voltmètre sont montés sur les fusibles de sortie du compteur. On allume des lampes de l'installation pour obtenir le débit désiré (fig. 10).

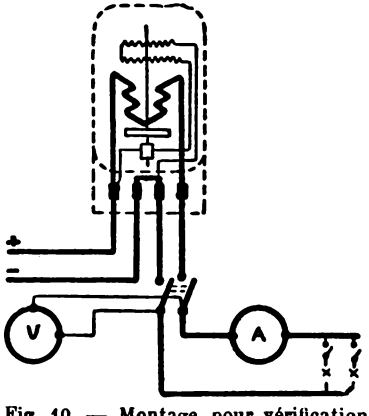


Fig. 10. — Montage pour vérification d'un compteur Thomson chez un abonné.

2° *si l'on dispose d'une montre ordinaire à secondes et non d'un chronoscope.*

Comme il a été indiqué pour le compteur O'K, on mesure le temps nécessaire pour que l'aiguille de l'un des cercles divisionnaires du cadran fasse un tour.

Parce que l'opération dure plusieurs minutes, il faut relever la tension et l'intensité toutes les minutes et prendre la moyenne des lectures.

10. — Réglage du compteur.

Ce réglage s'impose si l'erreur dépasse ± 0,03.

On l'effectue pour le grand et le moyen débit en déplaçant les shunts magnétiques placés en dérivation entre les pôles des aimants du frein. En rapprochant les shunts des aimants, on diminue le flux magnétique qui traverse le disque d'aluminium porté par l'arbre. Les courants de Foucault sont atténués, le compteur tourne plus vite. L'effet contraire se produit quand on éloigne les shunts.

C'est en enfonçant plus ou moins le fil de fer qui sert de noyau à la bobine additionnelle que l'on fait varier le couple moteur au faible débit. En l'enfonçant, le compteur accélère; en le retirant, l'induit ralentit.

Applications.

A. — Vérification et réglage des compteurs que l'on possède.

B. — Mesure du rendement en quantité d'une batterie d'accumulateurs.

a) **Partant d'une batterie déchargée, on effectue sa charge complète en plaçant un compteur O'K dans le circuit. On calcule la quantité d'électricité Q_e ampèreheures absorbée.**

b) **Immédiatement après la charge ou quelques jours plus tard, on décharge complètement la batterie à travers le compteur. On obtient ainsi Q_d la quantité d'électricité restituée par la batterie.**

c) **Le rendement en quantité est** $\eta = \frac{Q_d}{Q_e}$

Matériel nécessaire à la manipulation.

Un compteur O'K.
Un compteur wattheuremètre.
Un ampèremètre et un voltmètre étalonnés.
Un chronoscope ou une montre à secondes.
Un rhéostat.

Mesure d'une self par la méthode de Joubert.

1. — Construction de bobines de self-induction fixe sans noyau de fer.

Il n'existe pas de formules simples pour calculer les dimensions d'une bobine ayant une self de valeur déterminée, sauf s'il s'agit d'une bobine cylindrique à une seule couche très longue par rapport à son diamètre.

Pour construire une bobine dont la self ait un ordre de grandeur fixé à priori, on fabriquera une carcasse aux dimensions d'une bobine antérieurement réalisée et mesurée et l'on modifiera convenablement l'enroulement.

Par exemple, un étalon d'inductance Carpentier consiste en une bobine plate circulaire dont la gorge rectangulaire est garnie de fil de cuivre. Cette gorge a un diamètre extérieur de 144 millimètres, un diamètre intérieur de 48 millimètres et une hauteur de 36 millimètres (fig. 1). Le coefficient de self d'une telle bobine est environ le centième de la résistance ohmique. Il est facile de calculer le diamètre du fil de cuivre enroulé pour que la self soit 0,01, ou 0,1... ou 10 henrys; si l'on multiplie par p le nombre de spires, c'est-à-dire la longueur du fil, en divisant en même temps par p la section du fil, l'inductance de la bobine est multipliée par p^2; le volume du fil n'a pas changé mais la résistance de la bobine est devenue p^2 fois plus grande.

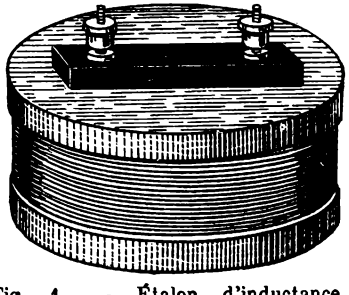


Fig. 1. — Étalon d'inductance. L'enroulement a un diamètre intérieur de 48 mm, extérieur de 144 mm et une hauteur de 36 mm.

2. — Construction de bobines dont la self-induction est variable de façon continue.

a) Un modèle de bobine de self-induction réglable sans noyau de fer, nommé ***variomètre***, se compose de deux bobines plates, rectangulaires

ou circulaires, concentriques. La bobine intérieure montée sur un axe diamétral prend diverses inclinaisons par rapport à la bobine fixe (fig. 2). Un cercle gradué mesure l'angle des plans des deux bobines. Les gorges où sont logés les enroulements ont une section carrée. *Les deux bobines sont connectées en série.*

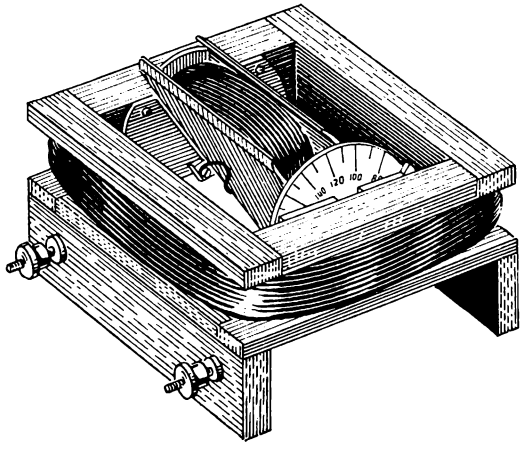


Fig. 2. — Variomètre, self réglable sans noyau de fer. La bobine intérieure peut tourner de 180°. Les bobines sont carrées. Le côté de la bobine fixe mesure 200 mm.

Le coefficient de self-induction de l'ensemble est minimum quand les deux bobines sont dans le même plan avec leurs enroulements en sens contraires; il est maximum quand la bobine mobile a tourné de 180° pour que les enroulements soient de même sens.

L'inductance peut varier ainsi de 1 à 3, par exemple de 0,22 à 0,66 henry avec une résistance totale de l'ordre de 9 ohms.

b) Un autre type consiste en une bobine à l'intérieur de laquelle on fait pénétrer plus ou moins un noyau de fer feuilleté [1]. Ce noyau se manœuvre soit à la main, soit, pour plus de précision, avec une vis et une manivelle. La self-induction croît à mesure que le noyau s'enfonce dans la bobine. Une graduation sert à repérer la position du noyau (fig. 3).

La bobine comporte moins de spires que le modèle sans fer; elle est moins résistante, mais, *pour une position déterminée du*

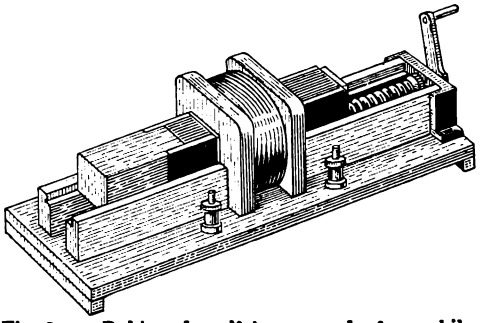


Fig. 3. — Bobine de self à noyau de fer mobile, circuit magnétique ouvert.

1. Dans la note qui suit la 39e manipulation, des indications sont données sur le calcul approximatif des inductances à noyau de fer.

noyau, elle ne possède pas un coefficient de self constant, parce que l'inductance dépend de l'induction dans le fer qui est fonction de l'intensité du courant dans l'enroulement.

Il est commode de prévoir plusieurs prises dans le bobinage, par exemple pour N spires au total, aux spires N : $\sqrt{2}$ et N : 2, on obtient ainsi trois séries de variations de self avec le même appareil avec des maximums proportionnels aux nombres 1, 2 et 4.

c) Dans un troisième modèle (fig. 4), la bobine est placée dans un

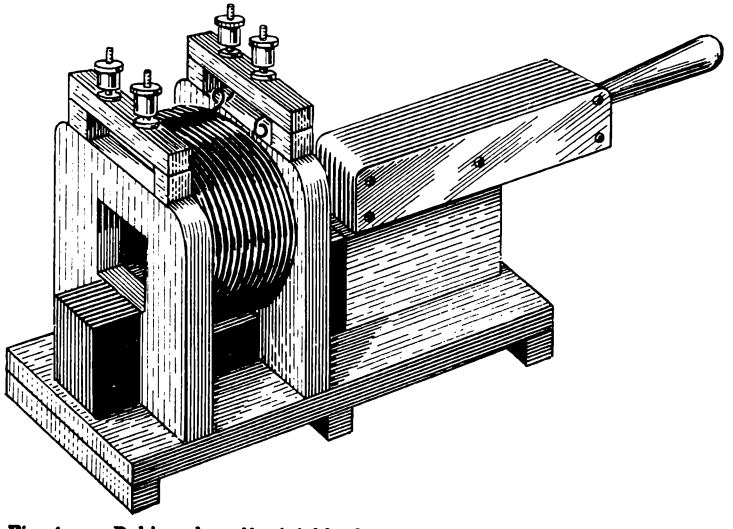


Fig. 4. — Bobine de self réglable dont le circuit magnétique est fermé en fin de course du noyau.

U en fer feuilleté dont les deux branches sont réunies par le noyau mobile, quand il est à fin de course, pour former un circuit magnétique fermé.

3. — Principe de la mesure d'une self par la méthode de Joubert.

On utilise la relation connue :

$$U = I\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$$

entre la tension, l'intensité et l'impédance dans une portion de circuit résistante et inductive.

Aux bornes du circuit dont on veut mesurer la self L henrys, on applique une tension alternative U volts de pulsation ω radians par seconde, et on mesure l'intensité I ampères.

Avec ces mesures, on calcule l'impédance

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}.$$

D'autre part, on mesure la résistance R ohms du circuit, puis on calcule la réactance L ω

$$L\omega = \sqrt{z^2 - R^2}$$

La pulsation de la tension $\omega = 2\pi f$ est connue avec une grande précision quand on utilise le secteur à fréquence standard 50 périodes par seconde, ou est calculée à l'aide de la vitesse et du nombre de pôles de l'alternateur qui fournit la tension U, d'où la valeur de L.

4. — Dispositif expérimental.

Supposons qu'il s'agisse de mesurer L pour *cinq* ou *six* positions du noyau d'une bobine de self variable.

1° La mesure de la résistance de la bobine s'effectue en se servant de courant continu par la méthode d'Ohm, de préférence avec des appareils à cadre mobile et aimant fixe.

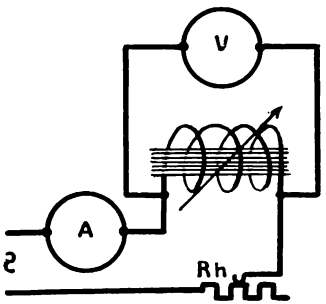


Fig. 5. — Mesure d'une self par la méthode de Joubert. Les appareils sont disposés comme pour la mesure d'une résistance par la méthode d'Ohm.

2° Pour mesurer l'impédance, il faut des ampèremètre et voltmètre pour courant alternatif. La disposition en est indiquée par la figure 5.

On commence par la position du noyau donnant la self la plus faible. On règle avec un rhéostat l'intensité à la valeur maximum que peut supporter la bobine. On note les valeurs de I et de U. Évidemment, il ne faut pas modifier la valeur de I sous prétexte de faire plusieurs mesures pour une position déterminée du noyau et calculer la moyenne des nombres obtenus, puisque la valeur de L change avec I.

Pour chacune des positions du noyau, on règle l'intensité à la même valeur et on mesure la tension correspondante.

Le tableau des lectures et des calculs sera du modèle suivant ;

MESURE DE LA SELF D'UNE BOBINE
quand la fréquence et l'intensité du courant sont constantes.

I. Mesure de la RÉSISTANCE.
Ampèremètre n°....
Voltmètre n°.....

LECTURES		CALCULS		
Voltmètre 150 divisions sensibilité : 15 V	Ampèremètre 100 divisions shunt : 10 A	U	I	$R = \frac{U}{I}$
1	2	3	4	5
Moyenne :				

II. Mesure de la SELF.
Ampèremètre n°.....
Voltmètre n°....

LECTURES		CALCULS				
Voltmètre 150 div. 150 V	Ampèremètre 100 div. 5 A	U	I	Z	Lω	L
1	2	3	4	5	6	7

Applications.

A. — Mesure de la self d'un transformateur.

Soit un petit transformateur monophasé de 1 200 VA, 200-63 V. On mesurera la self de l'enroulement HT en l'alimentant sous 200 V, puis la self de l'enroulement BT avec une tension de 63 V.

B. — Mesure du coefficient de self d'un variomètre.

On mesurera ce coefficient pour les positions de la bobine mobile à 0°, 30°..., 120°, 180° de la bobine fixe.

Tracer la courbe des valeurs obtenues en fonction de l'angle de rotation du variomètre.

Cette courbe servira dans l'étude de la résonance.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Une boîte de contrôle pour courant continu.
Une boîte de contrôle pour courant alternatif.
Un rhéostat.
Un variomètre.
Un transformateur 1 200 VA, 200-63 V.

Résonance. Circuit bouchon.

1. — Le phénomène de résonance a été étudié dans le cours d'électricité.

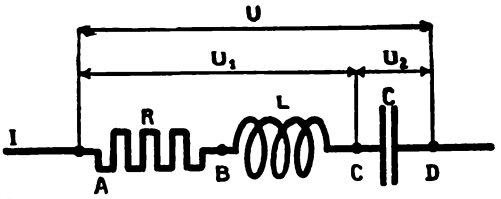


Fig. 1. — Circuit formé d'une résistance, d'une self et d'une capacité en série.
En réalité, la résistance et la self sont fournies par le même appareil : une bobine de self.

L'intensité du courant dans une portion de circuit (fig. 1), comprenant une résistance R ohms, une self L henrys, une capacité C farads, aux bornes de laquelle on applique une tension alternative U volts, de pulsation ω radians par seconde, est donnée par la formule

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

Quand $L\omega = \frac{1}{C\omega}$ ou $LC\omega^2 = 1$:

1° l'intensité atteint la valeur maximum

$$I' = \frac{U}{R};$$

2° le courant I' est en phase avec la tension U, puisque :

$$tg\ \varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} = 0$$

3° la tension U_1 aux bornes de la self est égale à la tension U_2 aux bornes de la capacité, car

$$U_1 = L\omega\ I' = U\ \frac{L\omega}{R} \quad \text{et} \quad U_2 = I' \times \frac{1}{C\omega} = U \times \frac{1}{R\ C\omega}$$

et

$$\frac{L\omega}{R} = \frac{1}{R\ C\omega}.$$

Cette tension U_1 ou U_2 peut dépasser beaucoup U si la résistance est faible par rapport à la réactance de self ($L\omega$) ou de capacité $\left(\frac{1}{C\omega}\right)$.

On dit que le circuit est en ***résonance***, et la condition de résonance est $LC\omega^2 = 1$.

Par exemple, avec la tension 110 volts du secteur à 50 périodes par seconde, quand la capacité en circuit est 20 microfarads, la résonance est obtenue pour

$$L = \frac{1}{C\omega^2} = \frac{10^6}{20 \times 314^2} = 0{,}51 \textit{ henry.}$$

Si la résistance du circuit est 10 ohms,

$$I' = \frac{110}{10} = 11 \textit{ ampères}$$

et la tension aux bornes de la self ou aux bornes de la capacité atteint

$$U_1 = U_2 = U\frac{L\omega}{R} = 110 \times \frac{0{,}51 \times 314}{10} = 1\,760 \textit{ volts.}$$

Pour réaliser la condition de résonance dans une portion de circuit, on peut laisser fixes deux des grandeurs self, capacité ou pulsation et faire varier la troisième. Il est nécessaire que la grandeur choisie comme variable puisse varier de façon continue.

2. — Traçons une courbe de résonance.

a) *Dispositif expérimental.*

Le circuit est constitué par une batterie de condensateurs de 20 μF et le variomètre décrit dans la manipulation précédente dont on a mesuré l'inductance L pour diverses positions de la bobine mobile (fig. 2).

Un ampèremètre A (0-5 A), est en série avec ces appareils. Un voltmètre V, (0-75 V), est monté en dérivation aux bornes du circuit. Un autre voltmètre V′ de 600 volts, indique la tension aux bornes du condensateur.

Pour éviter des surtensions capables de « claquer » le condensateur, on alimentera le circuit avec une tension inférieure à 30 volts.

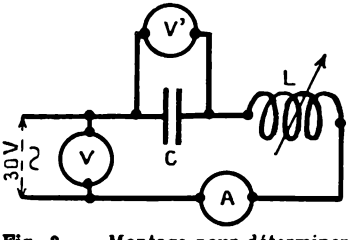


Fig. 2. — Montage pour déterminer une courbe de résonance.

b) *Mesures.*

Pour chacune des positions repérées de la bobine mobile du variomètre, on note le repère de celle-ci, on relève les indications de l'ampèremètre A et des voltmètres V et V′ et on les inscrit dans le tableau que voici ;

COURBE DE RÉSONANCE

LECTURES				CALCULS			
Repère du variomètre	Voltmètre V 150 div.=75V	Ampèremètre A 100 div. = 5A	Voltmètre V' 150 div.=600 V	L	U	I	U'
1	2	3	4	5	6	7	8

Valeurs à la résonance :

On détermine ensuite la position de la bobine mobile qui produit le maximum d'intensité et le maximum de tension indiqué par le voltmètre V'.

On notera cette position et les valeurs de I et de U' correspondantes.

On tracera sur du papier millimétrique la courbe de I en fonction de L.

3. — Variante de l'expérience précédente.

Si l'on dispose d'un groupe moteur à courant continu-alternateur ou d'une commutatrice inversée (alimentée par du courant continu), on cherchera la résonance d'un circuit en faisant varier la fréquence employée.

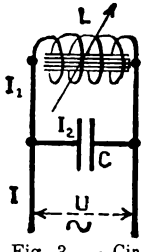


Fig. 3. — Circuit bouchon.

Le circuit sera constitué par une self fixe d'environ 0,50 henry et un condensateur de 20 microfarads. La tension alternative sera d'une trentaine de volts.

4. — Un circuit bouchon est constitué par une self non résistante shuntée par une capacité, self et capacité satisfaisant à la condition $LC\omega^2 = 1$.

L'ensemble est alimenté par une tension U de pulsation ω (fig. 3).

Dans la self, l'intensité est $I_1 = \frac{U}{L\omega}$ et le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ *en arrière* de la tension.

Dans la capacité, l'intensité est $I_2 = UC\omega$ et le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ *en avant* de la tension.

Or les deux courants I_1 et I_2 en opposition sont égaux; en effet, la condition $LC\omega^2 = 1$ s'écrit aussi :

$$\frac{1}{L\omega} = C\omega, \qquad \text{d'où} \qquad \frac{U}{L\omega} = UC\omega.$$

Leur somme est donc nulle : aucun courant n'est fourni par la ligne (fig. 4).

Notons que cet effet de bouchon ne se produit que pour la pulsation ω avec les valeurs L et C.

En réalité, il est imparfait : la self est résistante et le courant I_1

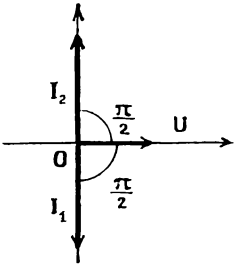


Fig. 4. — Si l'on pouvait constituer le circuit bouchon par une self pure et une capacité pure, les courants I_1 et I_2 seraient en opposition et auraient une résultante nulle.

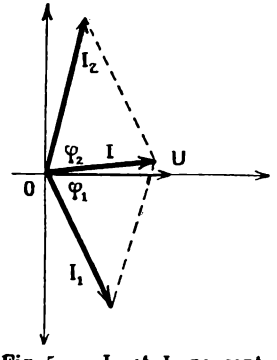


Fig. 5. — I_1 et I_2 ne sont pas tout à fait en opposition et leur résultante I n'est pas nulle.

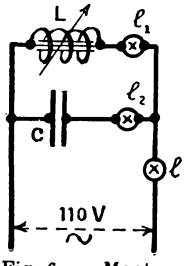


Fig. 6. — Montage d'un circuit bouchon.

est déphasé d'un angle φ_1 tel que $tg\ \varphi_1 = \frac{L\omega}{R}$ inférieur à $\frac{\pi}{2}$; le condensateur absorbe un faible courant actif à cause de son isolation imparfaite et de son hystérésis diélectrique et le courant I_2 est déphasé d'un angle φ_2 tel que $tg\ \varphi_2 = -\frac{1}{RC\omega}$ supérieur à $-\frac{\pi}{2}$. Les intensités I_1 et I_2 ne sont pas rigoureusement en opposition et leur résultante n'est pas nulle (fig. 5).

5. — Expérience qualitative.

La self réglable employée doit être peu résistante : on se servira d'une self à noyau de fer mobile pouvant atteindre 0,70 henry. La capacité du condensateur sera 15 microfarads.

On utilisera comme indicateurs de courant trois petites lampes l, l_1,l_2 de 2 volts, 0,5 ampère, placées, l'une sur la ligne, une autre en série avec la self, la troisième en série avec le condensateur (fig. 6).

Aux bornes du montage, on applique une tension de 110 volts à 50 périodes par seconde et on règle la self variable jusqu'à extinction de la lampe l, les deux autres lampes l_1, et l_2 brillent alors normalement.

Applications.

6. — Le phénomène de résonance est surtout utilisé en T. S. F.

C'est en effet un moyen d'obtenir soit un maximum d'intensité pour une fréquence déterminée, soit la sélection précise d'une fréquence choisie parmi d'autres simultanées.

La fréquence des courants de T. S. F. est élevée. Au lieu de la fréquence f d'un courant, on considère plutôt sa longueur d'onde λ. On sait que $f = V : \lambda$, V ayant pour valeur 300 000 *km/s* ou 3×10^8 *m/s*.

La condition de résonance d'un circuit

$$LC\omega^2 = 1 \qquad \text{ou} \qquad 4\pi^2 f^2 LC = 1$$

s'écrit, en remplaçant f par sa valeur $V : \lambda$

$$4\pi^2 V^2 LC : \lambda^2 = 1$$

d'où $$\lambda = 2\pi\sqrt{LC} \times 3 . 10^8 \text{ } \textit{mètres}$$

soit en évaluant L en *microhenrys*, C en *microfarads*

$$\lambda = 1\,885\sqrt{LC} \text{ } \textit{mètres}$$

Cette valeur de λ pour laquelle se produit la résonance se nomme la longueur d'onde du circuit. Un circuit comprenant self et capacité est dit *circuit oscillant*.

7. — Un ondemètre est un circuit oscillant dont la longueur d'onde est variable et étalonnée.

Un ondemètre est composé le plus souvent d'une self constante et d'un condensateur variable, parfois d'un condensateur fixe et d'une self variable. L'aiguille qui repère la position de l'organe mobile se déplace sur une échelle graduée en longueurs d'onde (fig. 7).

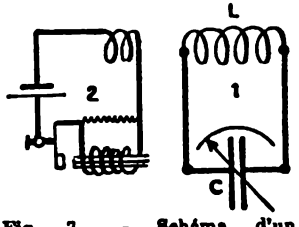


Fig. 7. — Schéma d'un ondemètre.
1. circuit oscillant.
2. vibrateur.

On induit un courant dans le circuit de l'ondemètre en produisant un courant interrompu avec un vibrateur dans une bobine de quelques spires, placée sur le même axe, à proximité de la self de l'ondemètre.

Un ondemètre consiste donc en un émetteur d'ondes amorties de longueurs connues, de très faible puissance.

8. — Un ondemètre sert à mesurer la longueur d'onde d'un circuit oscillant.

On munit ce circuit d'un détecteur, à galène par exemple, et d'un récepteur téléphonique (fig. 8). On l'excite au moyen de l'ondemètre dont on fait varier la longueur d'onde. Quand circuit et ondemètre sont en résonance, l'intensité du son dans le téléphone est maximum. La longueur d'onde de l'ondemètre qui produit ce maximum est la longueur d'onde du circuit.

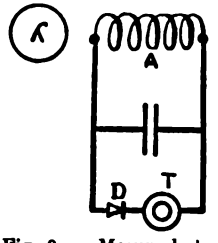


Fig. 8. — Mesure de la longueur d'onde du circuit A.
λ ondemètre,
D détecteur.
T téléphone.

9. — Avec un ondemètre, on mesure les selfs et les capacités utilisées en T. S. F.

Ces selfs sont de l'ordre de grandeur d'une centaine de microhenrys, les capacités de l'ordre du millième de microfarad.

Pour les mesurer, il faut disposer d'une capacité étalon par exemple de 0,001 microfarad.

a*) *Mesure d'une self.

On l'associe au condensateur étalon pour obtenir un circuit oscillant dont on mesure la longueur d'onde λ. On calcule L à l'aide de la relation

$$\lambda = 1\,885\ \sqrt{LC}.$$

Par exemple, pour C = 0,001 μF, si λ a été trouvé égal à 1 200 *m* :

$$L = \frac{1\,200^2}{1885^2 \times 0,001} \simeq 340 \text{ microhenrys.}$$

b*) *Mesure d'une capacité.

Avec une bobine de self et le condensateur étalon, on constitue un circuit oscillant dont on mesure la longueur d'onde, soit $\lambda_1 = 625\ m$,

On remplace le condensateur étalon par le condensateur à mesurer. on mesure la nouvelle longueur d'onde, soit $\lambda_2 = 1\,875\ m$.

Des deux relations

$$\lambda_1 = 1885\ \sqrt{LC}$$

$$\lambda_2 = 1885\ \sqrt{Lx}$$

on tire

$$x = C \times \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2$$

$$= 0,009 \text{ microfarad.}$$

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un condensateur de 20 microfarads.
Un variomètre de 0,66 henry.
Un ampèremètre pour courant alternatif 0-5 ampères.
Un voltmètre pour courant alternatif 0-75 volts, un autre 0-600 volts.
Un condensateur de 15 microfarads.
Une self réglable à noyau de fer mobile de 0,70 henry.
3 lampes de 2 volts, 0,5 ampère.
Un ondemètre 600-3000 mètres.
Des selfs et des condensateurs de T. S. F.

Mesure des capacités. Capacimètre.

1. — Un ampèremètre et un voltmètre suffisent pour mesurer certaines capacités.

On applique une tension alternative U volts, de pulsation ω radians par seconde, aux bornes du condensateur qui absorbe alors I ampères. De la relation connue

$$I = U C \omega \qquad (1)$$

on tire la valeur de C.

Sous une tension de 110 volts à 50 périodes par seconde, une capacité de 1 microfarad absorbe $I = 110 \times 10^{-6} \times 314 = 0{,}0345$ ampère. Avec un ampèremètre électromagnétique de sensibilité 1 ampère, il est possible de mesurer des intensités de 0,2 à 1 ampère ; la limite inférieure des capacités mesurables sous 110 volts est donc 6 microfarads. Cette limite descend à 0,03 microfarad si l'on dispose d'un milliampèremètre à redresseur de sensibilité 0,003 ampère.

Précision de la mesure. — Si la précision du voltmètre et de l'ampèremètre est 0,01, l'erreur relative possible sur la capacité est 0,02.

On sait que la résistance d'isolement entre les armatures d'un condensateur n'est pas extrêmement grande; de plus, des pertes d'énergie se produisent dans le diélectrique soumis à un champ électrique alternatif. Il en résulte que l'intensité absorbée par un condensateur est un peu plus grande que ne l'indique la formule (1). La mesure d'une capacité par cette méthode est donc peu précise.

Il faut que le condensateur puisse supporter 110 volts alternatifs : la méthode ne peut servir pour des condensateurs électrolytiques.

Les appareils sont disposés comme l'indique la figure 1.

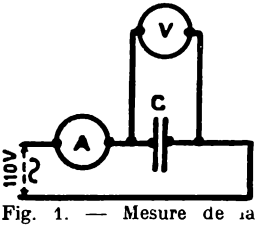


Fig. 1. — Mesure de la capacité du conducteur C avec un ampèremètre et un voltmètre.

2. — Méthode du pont de Sauty.

Les branches AB et AE d'un pont de

Wheatstone sont constituées par des résistances non inductives R et R', (fig. 2); BD par une capacité connue C; ED par la capacité à mesurer C'.

L'appareil de zéro formant la diagonale BE est un écouteur téléphonique de grande résistance.

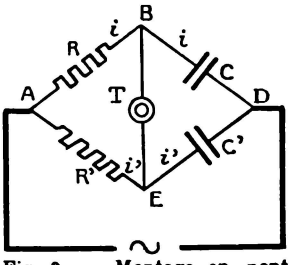


Fig. 2. — Montage en pont de Sauty.

Le pont est alimenté par du courant alternatif fourni par un vibrateur.

Le pont est en équilibre quand aucun courant ne passe dans la diagonale BE; on ne perçoit alors aucun son dans l'écouteur téléphonique. La condition de cet équilibre est :

$$C\,R = C'\,R' \qquad \text{d'où} \qquad C' = C \times \frac{R}{R'}.$$

Ce montage se nomme *pont de Sauty*.

Il est possible de le réaliser avec deux boîtes de résistances à fiches de 12 ou 16 bobines et un condensateur étalon dont la capacité est de préférence du même ordre de grandeur que la capacité à mesurer.

Des constructeurs d'instruments de mesures réunissent les organes d'un pont de Sauty, toutes connexions effectuées, dans un ensemble de petit volume contenant plusieurs condensateurs étalonnés, que l'on branche avec un commutateur. L'appareil se nomme un *capacimètre* (fig. 3). Des capacimètres permettent de mesurer des capacités comprises entre 0,000 01 et 100 microfarads.

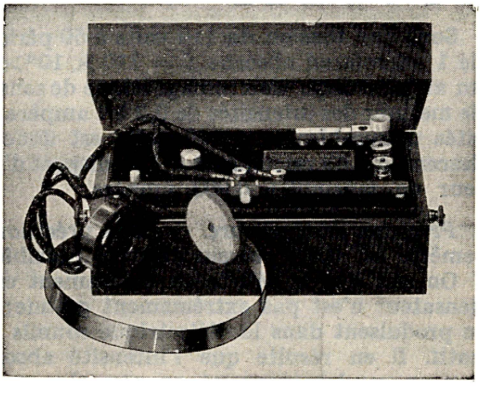


Fig. 3. — Capacimètre (Pont de Sauty). *(Construction Chauvin-Arnoux.)*

Applications.

A — Mesurer avec un ampèremètre et un voltmètre la capacité d'un condensateur servant à relever le facteur de puissance d'un moteur asynchrone.

B. — Mesurer au pont de Sauty :
1° un condensateur de T. S. F. au mica de faible capacité (0,001 μF);
2° un condensateur téléphonique de 1, 2 ou 4 microfarads;
3° un condensateur électrolytique.

C. — Calculer, construire et mesurer :
un condensateur mica-étain de 0,001 microfarad;
un condensateur papier paraffiné-étain de 0,01 microfarad.

D. — Étalonner un condensateur variable à air et tracer la courbe d'étalonnage.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

A. Un ampèremètre pour courants alternatifs 0-1 ampère.
Un voltmètre pour courants alternatifs 0-150 volts.
Un condensateur 15 ou 20 microfarads.

B. Deux boîtes de résistances à fiches de 16 bobines, 11 110 ohms.
Un condensateur étalon de 0,1 microfarad.
Un écouteur téléphonique.
Un vibrateur.
Des condensateurs de T. S. F. et téléphoniques.

Note complémentaire.

Démonstration de la condition d'équilibre d'un pont de Sauty.

A un instant quelconque t, quand le pont est en équilibre, la d. d. p. entre les points B et E est nulle (fig. 2). Soient i et i' les intensités, à l'instant t, dans les branches AB et BD, AE et ED du pont. La d. d. p. entre les points A et B est Ri entre les points A et E, $R'i'$, donc

$$Ri = R'i' \qquad (2)$$

q étant la charge du condensateur de capacité C à l'instant t, la d. d. p. entre les points B et D est $\frac{q}{C}$; q' étant la charge de C' la d. d. p. entre les points E et D est $\frac{q'}{C'}$ donc :

$$\frac{q}{C} = \frac{q'}{C'} \qquad (3)$$

Calculons la dérivée par rapport à t des deux membres de l'égalité (3) :

$$\frac{1}{C}\frac{dq}{dt} = \frac{1}{C'}\frac{dq'}{dt}$$

$\frac{dq}{dt}$ est l'intensité i du courant qui charge le condensateur C à l'instant t, $\frac{dq}{dt}$ le courant de charge du condensateur C', donc :

$$\frac{i}{C} = \frac{i'}{C'} \qquad (4)$$

Divisons membre à membre les égalités (2) et (4) :

$$R\,C = R'\,C'.$$

Remarque. — Nous avons supposé les condensateurs sans pertes. Parce qu'il n'en est pas ainsi en réalité, on n'obtient pas un silence complet du récepteur téléphonique par le réglage de R'. On admet que le pont est équilibré quand le son atteint le minimum d'intensité.

Mesure au wattmètre de la puissance d'un récepteur monophasé.

1. — Rappelons quelques propriétés des wattmètres électrodynamiques.

Le principe de ces appareils est étudié dans le cours d'électricité [1].

Un modèle de wattmètre de contrôle pour mesures industrielles possède souvent deux calibres d'intensité : 5 et 10 ampères, et deux calibres de tension : 150 et 300 volts.

Le cadran comporte 150 divisions. L'aiguille dévie de toute l'échelle pour les maximums U et I des calibres utilisés simultanément, quels que soient ces calibres. Les 150 divisions de l'échelle correspondent à la puissance UI *watts* et chaque division à $K = \frac{U\,I}{150}$ *watts*. Par exemple, dans le cas où U = 300 *volts* et I = 5 *ampères*, on trouve K = 1 500 : 150 = = 10 *watts*. Une déviation de l'aiguille de *d* divisions mesure une puissance P = 10 *d watts*.

La précision des mesures effectuées avec un wattmètre de contrôle est ± 0,004 du maximum de l'échelle dans le premier tiers de celle-ci et ± 0,01 de la lecture dans le reste de l'échelle.

L'isolement de l'appareil neuf a été essayé à 5 000 *volts* entre les bobines et la masse et à 500 *volts* seulement entre les deux circuits. On aura donc soin quand on emploiera un wattmètre, d'***éviter tout montage qui établirait une tension trop élevée entre le circuit à fil fin et la bobine d'intensité.***

2. — Les deux circuits d'un wattmètre peuvent être branchés l'un par rapport à l'autre de deux façons différentes.

Le circuit de tension est monté, par rapport au récepteur, soit ***en amont*** de la bobine d'intensité comme l'indique la figure 1, soit ***en aval*** suivant le schéma de la figure 2.

1. ***Électricité industrielle, Lois générales :*** **48e et 57e leçons.**

Supposons, pour simplifier, qu'intensité et tension soient en phase.

En employant les notations de la figure 1, on voit que dans le montage *amont*, au lieu de mesurer UI, on mesure U'I. L'erreur absolue commise

$$U'I - UI = (U' - U)\,I = u\,I,$$

u étant la chute de tension dans la bobine d'intensité, est égale à la puissance consommée dans la bobine d'intensité.

L'erreur relative a pour valeur $\frac{u\ I}{U\ I} = \frac{u}{U}$.

Dans le cas du montage *aval*, au lieu de UI, on mesure UI'. L'erreur absolue qui en résulte

$$UI' - UI = (I' - I)U = Ui$$

est égale à la puissance dissipée dans le fil fin. L'erreur relative est $\frac{i}{I}$.

Quand on connaît la résistance r de la bobine d'intensité et celle R du

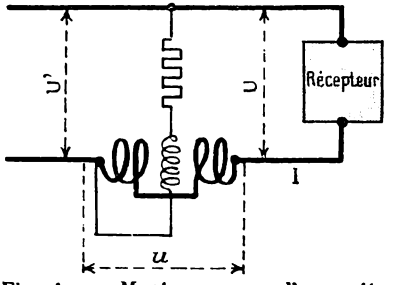


Fig. 1. — Montage *amont* d'un wattmètre. — L'erreur absolue commise, par excès, est égale à la puissance consommée dans la bobine d'intensité.

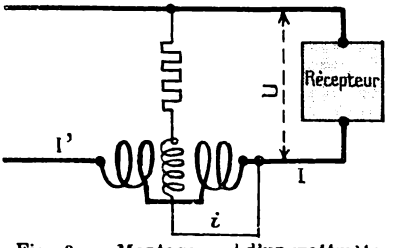


Fig. 2. — Montage *aval* d'un wattmètre. — L'erreur absolue commise, par excès, est égale à la puissance consommée dans la bobine de tension.

circuit à fil fin du wattmètre, il est possible de calculer, pour la mesure d'une puissance déterminée P = UI, les erreurs relatives résultant de l'un ou l'autre montage. Ces erreurs sont, en général, inférieures à la précision du wattmètre, et le mode de montage est pratiquement indifférent.

Par exemple, les valeurs r = 0,06 *ohm* et R = 12 000 *omhs* ont été trouvées pour un wattmètre de 10 *ampères*, 300 *volts*. S'il s'agit de mesurer avec cet instrument la puissance active d'un récepteur de 1 800 *volts-ampères* sous 200 *volts*, U = 200 *volts*, $I = 9$ *ampères*, $u = 0{,}06 \times 9 = 0{,}54$ *volt*, $i = \frac{200}{12\,000} = 0{,}017$ *ampère*.

L'erreur relative due au montage *amont* est : $\frac{u}{U} = \frac{0{,}54}{200} = 0{,}0027$

celle due au montage *aval* : $\frac{i}{I} = \frac{0{,}017}{9} \simeq 0{,}002$.

Le montage *aval* est théoriquement préférable, mais en pratique les lectures au wattmètre dont la précision est seulement ± 0,01 seront les mêmes, quel que soit le montage.

3. — Cas simple d'emploi d'un wattmètre : la tension et l'intensité dans le récepteur peuvent être supportées par l'appareil de mesure.

Il s'agit, par exemple, de mesurer la puissance absorbée par un récepteur de 1 800 *volts-ampères* fonctionnant sous 200 *volts*.

Un wattmètre de 10 *ampères*, 300 *volts*, sans accessoires, suffit pour la mesure. Le montage est indiqué par la figure 3.

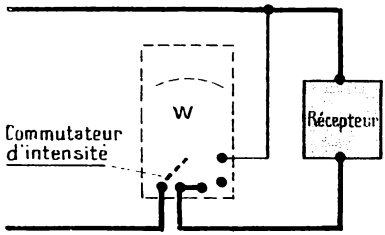


Fig. 3. — Montage simple d'un wattmètre pour mesurer la puissance d'un récepteur monophasé, — La borne de tension la plus voisine des bornes d'intensité est connectée à l'une de celles-ci.

Pour que la tension soit la plus faible possible entre les bobines fixe et mobile, ***la borne de tension la plus voisine des bornes d'intensité est connectée à l'une de celles-ci.***

Si l'aiguille dévie en sens inverse de l'échelle, on intervertit les connexions du circuit intensité.

4. — Quand la tension du récepteur dépasse le calibre du wattmètre, on peut ajouter une résistance dans le circuit fil fin.

Cette résistance additionnelle est en manganine, et non inductive. Elle est réglée

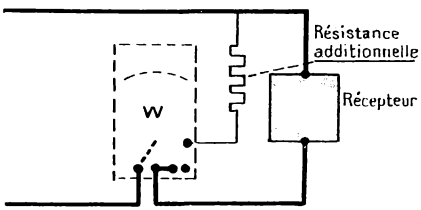


Fig. 4. — La résistance additionnelle est montée sur le *fil non connecté* au *circuit d'intensité* : le montage est bon.

à la valeur convenable par le constructeur et comporte des prises pour des tensions différentes, parfois jusqu'à 6 000 volts.

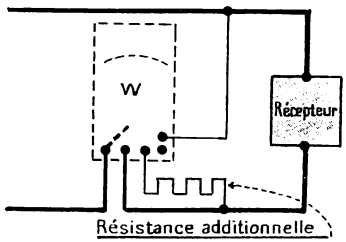


Fig. 5. — La résistance additionnelle ainsi placée cause une tension élevée entre les deux bobines du wattmètre : le montage est dangereux.

Pour éviter un court-circuit entre les bobines fixe et mobile, il faut avoir soin de placer toujours la résistance additionnelle sur le fil qui n'aboutit pas à une borne intensité (fig. 4 et 5).

5. — Dans le cas de grandes intensités ou de tensions élevées, on alimente le wattmètre avec des transformateurs de courant et de tension (fig. 6).

Ces transformateurs de mesure ont un circuit magnétique fermé. Ils sont refroidis par air ou par huile.

Un ***transformateur de tension*** fournit une tension secondaire qui est pratiquement proportionnelle à la tension primaire et, pour un sens convenable des connexions, déphasée par rapport à celle-ci d'un angle presque nul.

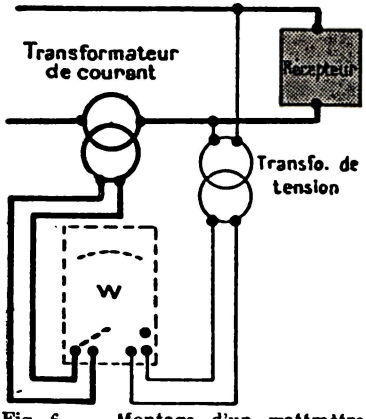


Fig. 6. — Montage d'un wattmètre avec transformateur de courant et transformateur de tension.

Les *tensions nominales* ou *calibres* primaire U_{1n} et secondaire U_{2n} sont les tensions efficaces maximums admissibles aux bornes de l'appareil. Le *rapport de transformation nominal*, qui ne diffère pratiquement pas du rapport de transformation à toutes tensions, est le rapport $K_n = U_{1n}/U_{2n}$. Il est poinçonné sur la plaque de l'appareil sous forme d'une fraction donnant à la fois la valeur du rapport et les calibres primaire et secondaire.

Par exemple, l'indication K_n = 15 000/150 signifie :

1° que le rapport de transformation est 100,

2° que le transformateur peut être utilisé jusqu'à 15 000 *volts* au primaire, le secondaire étant branché sur un appareil de mesure construit pour 150 *volts*.

De même, ***un transformateur de courant ou d'intensité*** est caractérisé par ses *intensités nominales* primaire I_1n et secondaire I_2n, son *rapport de transformation nominal* $K_n = I_1n / I_2n$ marqué sur une plaque sous forme d'une fraction dont les deux termes sont les intensités maximums admissibles dans les deux circuits du transformateur.

Par exemple, l'indication K_n = 100/5 signifie que l'appareil peut supporter 100 *ampères* dans le primaire monté en série avec le récepteur étudié et que le secondaire doit être branché sur un appareil de mesure de calibre 5 *ampères*. Le rapport de transformation est 20.

La *puissance de précision* d'un transformateur de mesure est le maxi-

mum de puissance apparente que l'appareil peut débiter au secondaire sans introduire dans les mesures des erreurs dépassant les valeurs garanties. Ces erreurs, pour un transformateur d'appareil de contrôle dit transformateur de classe B, sont ± 0,01 pour le rapport de transformation et 30′ pour le déphasage.

Par exemple, on construit des transformateurs de mesure de 5 ou 15 volts-ampères pour 5 ampères ou 150 volts au secondaire.

Il faut *avoir soin de ne jamais faire fonctionner un transformateur de courant en laissant ouvert le circuit secondaire.* Le transformateur a été en effet calculé et construit pour être employé avec le secondaire en court-circuit. Les ampères-tours secondaires s'opposent aux ampères-tours primaires et réduisent beaucoup le flux dans le circuit magnétique. Ils sont nuls quand le secondaire est ouvert, le flux important induit dans le secondaire une tension dangereuse.

Les transformateurs de mesure s'emploient avec des ampèremètres et des voltmètres comme avec des wattmètres. On ne se sert pas de shunt pour mesurer un courant alternatif avec un ampèremètre électrodynamique ou électromagnétique à cause de l'inductance de la bobine ampèremétrique qui produit une réactance variable avec la fréquence dans le circuit dérivé sur le shunt. L'adjonction d'accessoires aux instruments de mesure, pour augmenter leur portée, diminue évidemment la précision de l'ensemble de l'appareil.

La figure 6 est le schéma de montage d'un wattmètre avec transformateur de tension et transformateur de courant.

Applications.

A. — Mesure de la puissance absorbée par un transformateur monophasé.

Il s'agit d'un petit transformateur de 1 800 VA, 200-65 V.

En plus du wattmètre, on montera sur le primaire à 200 V un ampèremètre et un voltmètre (fig. 7), pour mesurer en même temps la puissance active et la puissance apparente. On calculera le facteur de puissance

$$\cos \varphi = \frac{W}{UI}$$

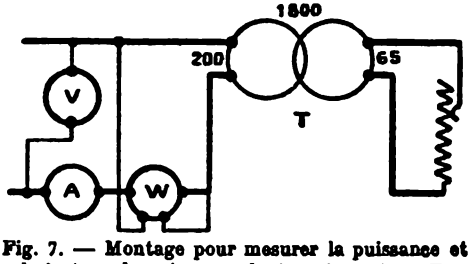


Fig. 7. — Montage pour mesurer la puissance et le facteur de puissance du transformateur *T*.

On chargera le transformateur en le faisant débiter dans un rhéostat. Les mesures seront inscrites dans un tableau du modèle suivant :

PUISSANCE DU TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ....

LECTURES			CALCULS				
Voltmètre Calibre : 150 V Divisions : 150	Ampèremètre Shunt : 15 A Divisions : 150	Vattmètre K = ...	U	I	UI	W	$\cos\varphi = \frac{W}{UI}$
1	2	3	4	5	6	7	8

B. — Mesure du facteur de puissance d'une bobine de self.

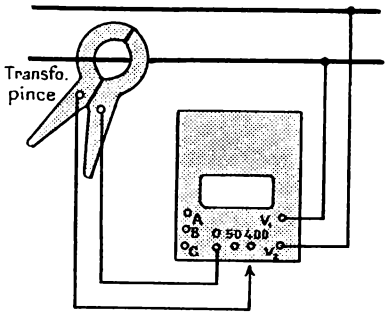


Fig. 8. — Branchement d'un phimètre sur un circuit monophasé.

On se servira de la bobine de self à noyau de fer de la 18e manipulation.

Les ampèremètre, voltmètre et wattmètre seront montés comme il a été indiqué pour le transformateur.

C. — Emploi d'un phimètre.

Quand on désire seulement connaître le cos φ d'un récepteur, on le mesure directement avec un phasemètre.

Un phasemètre de contrôle Chauvin-Arnoux, nommé *phimètre*[1], est très commode à employer. La figure 8 indique son montage.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un wattmètre 5-10 ampères, 150-300 volts, avec les accessoires : résistance additionnelle, transformateurs de mesure.
Un ampèremètre électromagnétique 15-30 ampères.
Un voltmètre électromagnétique 150-300 volts.
Un transformateur monophasé 1 800 VA, 200-65 V.
Une bobine de self à noyau de fer avec un rhéostat.
Un phimètre.

1. *Électricité industrielle, Lois générales :* 64e et 67e leçons.

Mesure au wattmètre de la puissance d'un récepteur triphasé.

1. — Un seul wattmètre suffit quand les trois phases du récepteur sont équilibrées.

Cet équilibre est à peu près réalisé quand il s'agit d'un moteur triphasé.

Il suffit alors de mesurer la puissance d'une phase en intercalant la bobine d'intensité du wattmètre dans un fil de ligne et en branchant le circuit tension entre ce fil et le point neutre (fig. 1). On multiplie par 3 la puissance obtenue.

Quand le récepteur couplé en triangle n'a pas de point neutre, ou que le point neutre est inaccessible dans un couplage en étoile, on crée un

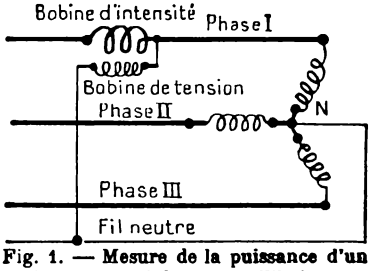


Fig. 1. — Mesure de la puissance d'un récepteur triphasé équilibré avec point neutre accessible.

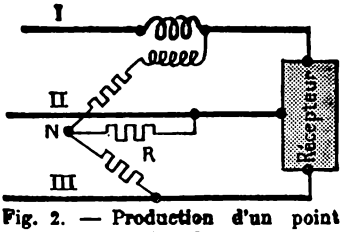


Fig. 2. — Production d'un point neutre artificiel. Les résistances R sont de l'ordre de 6 000 Ω pour un wattmètre de 150 V.

point neutre artificiel en montant trois grandes résistances égales en étoile et en branchant chacune des trois extrémités libres sur un fil de ligne (fig. 2).

Le circuit tension du wattmètre peut constituer l'une de ces résistances; les deux autres résistances additionnelles, égales à celles du circuit fil fin du wattmètre, sont placées dans une boîte séparée (fig. 3). Quel-

quefois, pour des tensions peu élevées, les trois résistances additionnelles sont montées à demeure dans le boîtier de l'appareil.

On multiplie par 3 la puissance lue sur l'échelle du wattmètre.

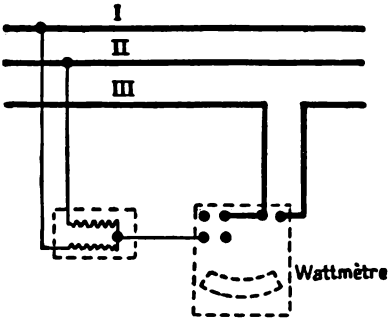


Fig. 3. — La boîte de résistances additionnelles pour constituer un point neutre comprend deux résistances égales à celle du circuit de tension du wattmètre.

2. — Avec un wattmètre ordinaire, il est facile de mesurer la puissance réactive d'un récepteur triphasé équilibré.

La puissance active d'un récepteur triphasé a pour valeur

$$P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$$

La puissance réactive est :

$$P_r = UI\sqrt{3}\sin\varphi$$

U est la tension composée entre fils de ligne; I, le courant dans chaque fil; φ le déphasage entre le courant et la tension dans chacun des trois circuits constituant le récepteur triphasé équilibré.

L'examen du diagramme des tensions dans un récepteur triphasé

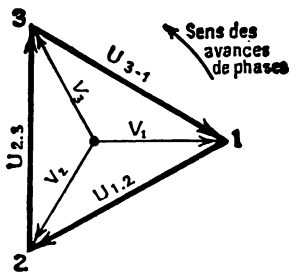


Fig. 4. — Diagramme des tensions simples et composées aux bornes d'un récepteur triphasé.
Chaque tension composée est en quadrature avec une tension simple.

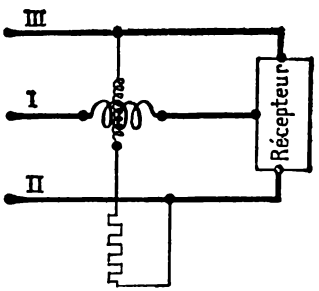


Fig. 5. — Mesure de la puissance réactive d'un récepteur triphasé équilibré. — Comparez avec le montage pour la mesure de la puissance active.

(fig. 4) montre que la tension composée $U_{2.3}$ entre les phases 2 et 3 est normale à la tension simple de la phase 1 par rapport au point neutre.

Donc si l'on fait passer dans la bobine d'intensité d'un wattmètre le courant I_1 et qu'on applique aux bornes du circuit de tension la tension composée $U_{2.3}$ (fig. 5) le wattmètre indique une puissance :

$$P'_r = UI \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) = UI \sin \varphi$$

et l'on peut calculer la puissance réactive du récepteur.

$$P_r = UI\sqrt{3} \sin \varphi = P'_r\sqrt{3}.$$

Un wattmètre avec résistances additionnelles intérieures formant un point neutre convient bien pour cette mesure. La figure 6 est le schéma des circuits d'un tel instrument. On remarquera le commutateur qui dans la position PA donne la mesure de la puissance active et dans la position PR celle de la puissance réactive. Dans la position PR de l'inverseur, la résistance du circuit de tension, au lieu de R, est $R\sqrt{3}$: le wattmètre mesure donc une puissance

$$P''_r = VI \sin \varphi$$

La puissance réactive totale du récepteur égale donc 3 fois la puissance lue.

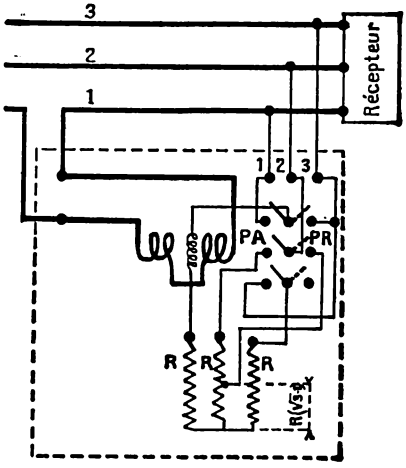


Fig. 6. — Schéma d'un wattmètre pour la mesure des puissances active et réactive d'un récepteur triphasé équilibré. Remarquez que le circuit de tension a pour résistance $R\sqrt{3}$ quand on mesure une puissance réactive.

3. — La méthode des deux wattmètres est la plus employée à la mesure de la puissance active dans le cas d'une installation triphasée qui peut être déséquilibrée.

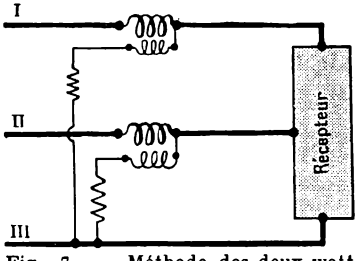


Fig. 7. — Méthode des deux wattmètres. Schéma du montage.

Cette méthode a été étudiée dans le cours d'électricité.

Pour se souvenir du mode de montage des appareils de mesure, il est commode de considérer que l'énergie fournie au récepteur triphasé lui est amenée par deux fils de ligne I et II, le troisième fil III sert de fil de retour. Donc :

La bobine d'intensité du premier wattmètre est mise en série sur la ligne I, le circuit de tension est en dérivation entre les lignes I et III;

la bobine d'intensité du deuxième wattmètre est mise en série sur la ligne II, le circuit de tension est en dérivation entre les lignes II et III (fig. 7).

On sait que l'on mesure ainsi

$$P_1 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$$

et

$$P_2 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$$

et que

$$P = P + P_2$$

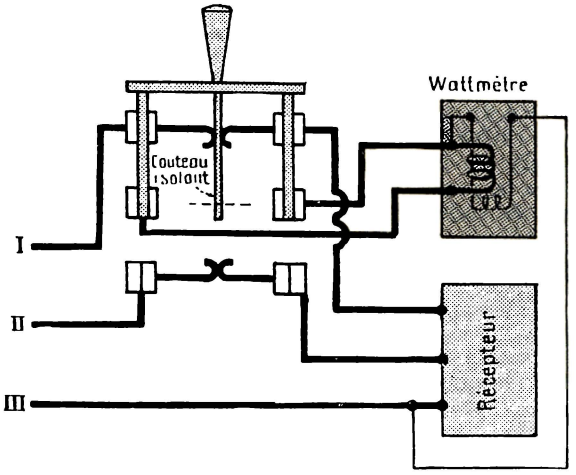


Fig. 8. — Commutateur pour la mesure d'une puissance par la méthode des deux wattmètres.

La puissance P est négative quand φ est supérieur à $\frac{\pi}{3}$, soit 60°. On s'en rend compte parce qu'il faut inverser les connexions à l'un des circuits du wattmètre, de préférence à la bobine d'intensité, pour pouvoir faire les lectures.

En pratique, on n'emploie qu'un seul wattmètre que l'on place successivement sur les phases I et II au moyen d'un commutateur tripolaire qui effectue l'opération sans couper les courants dans le récepteur (fig. 8).

4. — Mesure du facteur de puissance d'un récepteur ou d'une installation réceptrice.

On calcule le facteur de puissance à partir des mesures wattmétriques.

1° Si l'on a mesuré la puissance active P et la puissance réactive P_r

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + P_r^2}}. \qquad (1)$$

2° En même temps que l'on mesure la puissance active P par la méthode des deux wattmètres, on mesure avec un ampèremètre et un voltmètre la puissance apparente $UI\sqrt{3}$, et

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI\sqrt{3}}. \qquad (2)$$

3° Le déphasage φ se calcule aussi avec les lectures faites en employant la méthode des deux wattmètres :

$$P_1 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right) \qquad P_2 = UI\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$$

En divisant ces deux expressions membre à membre :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)} = \frac{\cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi + \sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi}{\cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi - \sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi}$$

soit

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{\sin\frac{\pi}{6}\sin\varphi}{\cos\frac{\pi}{6}\cos\varphi} = \operatorname{tg}\frac{\pi}{6}\operatorname{tg}\varphi$$

Or

$$\operatorname{tg}\frac{\pi}{6} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

donc

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\,\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \qquad (3)$$

Dans une table des rapports trigonométriques naturels, connaissant tg φ, on trouve la valeur de φ et celle de cos φ.

Il est d'ailleurs possible de calculer cos φ à partir de tg φ, puisque

$$\cos\varphi = \pm\sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}}$$

Certains formulaires d'électriciens contiennent une table des valeurs de cos φ en fonction du rapport $\frac{P_1}{P_2}$.

Remarque. — Le facteur de puissance est déterminé avec le maximum de précision quand on utilise les mesures de la puissance active et de la puissance réactive.

L'utilisation de la formule (2) nécessite l'emploi de trois appareils de mesure dont les erreurs relatives s'ajoutent.

Dans la formule (3), la différence $P_1 - P_2$ est évaluée avec peu de précision si P_1 et P_2 ne sont pas très différents et de même signe. Si P_1 et P_2 sont de signes différents, c'est leur somme $P_1 + P_2$ qui est peu précise quand leurs valeurs absolues sont voisines.

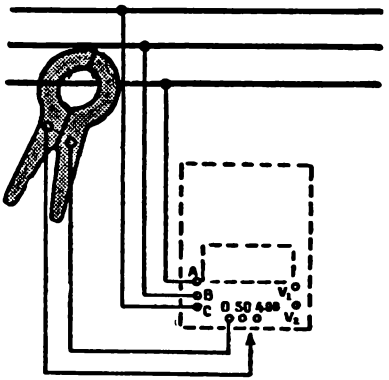


Fig. 9. — Branchement d'un phimètre sur une ligne triphasée.
Le fil aboutissant à la borne A est connecté d'autre part à la phase sur laquelle est prise l'intensité.

Emploi d'un phimètre. — L'appareil s'installe sans qu'il soit nécessaire d'interrompre le courant dans le récepteur.

Le transformateur-pince est disposé sur l'un quelconque des fils de phases (fig. 9); trois conducteurs relient les fils de phases aux prises A_1 B, C de l'appareil. La prise A doit toujours être reliée à la phase sur laquelle est prise l'intensité.

Applications.

De nombreuses mesures de puissance, fort instructives, sont à effectuer dans les ateliers de l'École. En voici quelques exemples.

A. — Puissance absorbée pour la commande d'une machine-outil.

On choisira un tour parallèle commandé par un moteur asynchrone triphasé de 1 à 2 chevaux à 200 volts.

On mesurera la puissance absorbée par le moteur et le facteur de puissance correspondant :

1° le moteur à vide, courroie enlevée;

2° le moteur entraînant le tour à vide aux différentes vitesses, l'avance du chariot étant embrayée;

3° le moteur entraînant le tour qui effectue une passe d'ébauche normale aux différentes vitesses.

Le montage dépendra des appareils de mesure dont on dispose. Le plus commode est d'employer un wattmètre pour puissance active et puissance réactive en circuit équilibré.

Les mesures seront inscrites dans un tableau du modèle suivant :

COMMANDE DU TOUR PARALLÈLE N°

Moteur asynchrone triphasé 1,5 *ch*, 1500 *t/mn*, 200 *V*
Wattmètre 5-10 *A*, 150 *V*, K = 5 *W*, K' = 10 *W*

	LECTURES			CALCULS				
	K (1)	p. active (2)	p. réactive (3)	P (4)	Pr (5)	cos φ (6)	puis. utile (7)	rendement (8)
Moteur à vide.....								
Tour à vide 1re vitesse				W_1				
Tour à vide 2e vitesse								
Tour à vide								
Passe normale 1re vitesse				W'			W' — W_1	$\frac{W' - W_1}{W'}$
Passe normale 2e vitesse								
Passe normale								

B. — Énergie absorbée pour la production d'un kilogramme de copeaux de fonte douce par fraisage.

On mesurera la puissance absorbée par le moteur de commande de la fraiseuse :

1° la machine à vide à la vitesse de travail, avance de la table embrayée;

2° la fraiseuse exécutant une passe d'ébauche sur un morceau de fonte douce préalablement pesé. Lectures toutes les minutes. La durée en secondes d'exécution de la passe sera déterminée avec un chronomètre.

Une seconde pesée indiquera le poids de fonte enlevé.

On calculera l'énergie utile employée par kilogramme de copeaux.

C. — Mesure de la puissance absorbée par les ateliers de l'École et facteur de puissance correspondant.

Un transformateur de courant sera nécessaire pour alimenter le circuit d'intensité du wattmètre. Les lectures seront faites toutes les quinze minutes au cours d'une journée entière.

On tracera la courbe de la puissance absorbée et celle du cos φ en fonction du temps.

Il existe des wattmètres enregistreurs qui fournissent de telles courbes.

D. — Mesure du facteur de puissance des installations électriques des différents ateliers de l'École.

Cette mesure est à faire au phimètre à intervalles d'une demi-heure pendant un après-midi.

On distinguera la période pendant laquelle on utilise exclusivement de la force motrice et celle où fonctionne en outre l'éclairage artificiel.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un wattmètre pour puissances active et réactive d'un récepteur triphasé équilibré, 5-10 *A*, 150 *V*.

Un wattmètre monophasé, 5-10 *A*, 150-300 *V*.

Un commutateur de wattmètre.

Un phimètre.

Étalonnage d'un compteur monophasé.

Le modèle étudié est le compteur ACT 5, fort employé dans les installations d'appartement.

1. — Examinons la constitution d'un tel compteur.

L'appareil se compose d'un mécanisme moteur commandant la minuterie et d'un triple dispositif de réglage.

Mécanisme moteur (fig. 1). Un électro-aimant feuilleté comprend trois branches A, B, C à sa partie supérieure. La branche médiane est divisée en deux à la partie inférieure.

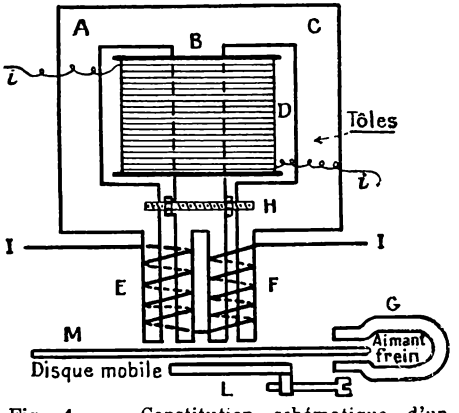


Fig. 1. — Constitution schématique d'un compteur ACT 5

Une bobine D de fil long et fin entoure cette branche. Elle est montée en dérivation entre les deux fils de ligne : c'est la *bobine de tension.*

Deux bobines E et F, de gros fil, en série, entourent respectivement l'extrémité inférieure de chaque branche de l'électro-aimant et la moitié voisine de la branche médiane. Elles sont parcourues par le courant total de l'installation : ce sont les *bobines d'intensité.*

Un disque d'aluminium M, mobile autour d'un axe vertical, est placé devant les extrémités polaires de l'électro. Il tourne entre les deux pôles d'un aimant permanent G qui le freine en y produisant des courants de Foucault. L'arbre de ce disque entraîne la minuterie.

Dispositif de réglage. — 1° L'aimant G freine le disque d'aluminium au maximum quand ses pôles sont placés à la périphérie du disque, le freinage diminue quand on les rapproche de l'axe.

2° Une spire conductrice H (appelée spire de Frager), entoure la branche médiane de l'électro-aimant (fig. 2). Elle est faite d'un étrier en cuivre de forte section fermé à l'avant par une vis mi-partie maillechort, mi-partie cuivre. En tournant la vis dans ses écrous, on modifie la résistance de la spire.

Ce dispositif agit sur le déphasage du flux dans le noyau de la bobine par rapport au courant *i* de la bobine de tension. En effet, le flux à travers la spire y induit une f. é. m. *e* en quadrature arrière avec le champ inducteur. A cause de l'inductance *l* de la spire, le courant qu'y produit la f. é. m. est déphasé en arrière de *e* d'un angle α tel que $\text{tg}\,\alpha = l\omega : r$. Le champ magnétique propre à la spire de Frager, qui se compose avec le champ de la bobine, est donc déphasé par rapport au champ résultant d'un angle compris entre $\pi : 2$ et π. Cet angle varie avec *r*. Par modification de *r*, il est donc possible de régler le déphasage par rapport à *i* du flux résultant.

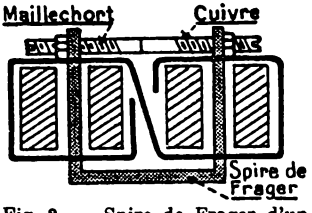


Fig. 2. — Spire de Frager d'un compteur. Remarquer le sens contraire des enroulements sur les pièces polaires.

3° Une plaquette de fer doux L, déplaçable par vis devant les pôles de l'électro, fait varier la réluctance du circuit magnétique, par conséquent le flux à travers le disque d'aluminium et le couple moteur qui en résulte.

2. — Voici une explication simplifiée du fonctionnement du compteur.

Remarquons d'abord que les deux régions d'action des pièces polaires de l'électro sur le disque d'aluminium ne se trouvent pas sur un même diamètre.

Le courant *i* dans la bobine de tension et le courant I autour des pièces polaires produisent chacun un champ alternatif. Ces deux champs se composent entre eux dans les pièces polaires. A cause des sens contraires d'enroulement du fil d'intensité sur les branches E et F, le champ résultant n'est pas le même dans E et dans F. Les flux correspondants induisent des courants de Foucault dans la plaque d'aluminium. La branche E agit sur les courants produits par F, la branche F sur les courants produits par E, ces forces électromagnétiques dissymétriques ne s'équilibrent pas et mettent le disque en mouvement.

Il serait difficile de préciser cette théorie parce que le circuit magnétique du compteur ACT est compliqué.

Supposons, pour simplifier, que les courants *i* et I parcourent deux bobines différentes N et P agissant à la fois sur le disque M (fig. 3). La bobine de tension N possède un grand nombre de spires de fil fin, son

inductance est grande; la bobine d'intensité P n'a que quelques tours de gros fil, sa self est petite.

Le courant i, proportionnel à U, est déphasé de près de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de la tension U qui le produit, à cause de la grande inductance de N. Le flux dans le noyau de la bobine N est donc aussi déphasé du même angle sur la tension U. La spire de Frager ajuste ce déphasage exactement à la valeur $\frac{\pi}{2}$. Quel est le déphasage sur U des courants de Foucault induits dans le disque par la bobine N? Une f. é. m. induite est en quadrature arrière avec le flux inducteur; le courant produit dans un circuit peu résistant mais inductif est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de la f. é. m., c'est-à-dire en opposition avec le courant inducteur. Les courants de Foucault produits par N sont donc déphasés de $\frac{3\pi}{2}$ en arrière de U.

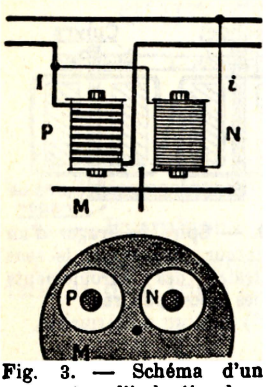


Fig. 3. — Schéma d'un compteur d'induction dans lequel les circuits d'intensité et de tension sont séparés.

Le flux du noyau de la bobine P qui agit sur ces courants est proportionnel à I et en phase avec I. Or U et I sont déphasés l'un par rapport à l'autre de l'angle φ. Le couple moteur produit par P sur les courants de Foucault dus à N est donc de la forme

$$K_1 UI \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \varphi\right) = K_1 UI \cos\varphi.$$

D'autre part, les courants induits dans le disque par la bobine P sont déphasés de π en arrière de I, donc de $\pi + \varphi$ en arrière de U et par suite de $\pi + \varphi - \frac{\pi}{2}$ arrière du flux dû au courant i produit par U dans la bobine N. La bobine N agissant sur les courants de Foucault dus à P, détermine donc un couple moteur de la forme

$$K_2 UI \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = K_2 UI \cos\varphi$$

Le couple moteur total est ainsi

$$C_m = K\, UI \cos\varphi.$$

Le couple résistant dû aux courants de Foucault induits dans le disque par l'aimant permanent entre les pôles duquel il passe à la vitesse de n tours par seconde est proportionnel à cette vitesse :

$$C_r = K'n.$$

Or, en régime normal, $C_m = C_r$, donc $n = \frac{K}{K'} UI \cos \varphi$; au bout de secondes de régime constant

$$n\,t = \frac{K}{K'} UI.\ t.\ \cos \varphi.$$

Le nombre de tours du disque enregistré par la minuterie est donc proportionnel à l'énergie consommée dans l'installation.

3. — Examinons la plaque signalétique et la disposition des bornes du compteur.

Sur la plaque, nous relevons que le compteur à vérifier admet un courant maximum de 5 ampères et une tension de 110 volts. La constante du compteur, c'est-à-dire l'énergie enregistrée par tour de disque, est K = 0,2 *Wh*.

Le compteur porte 4 bornes. Les deux bornes médianes sont court-circuitées. Les bobines d'intensité sont reliées aux deux bornes extrêmes; la bobine de tension est en dérivation entre la première et la deuxième borne. Le montage normal de l'appareil est indiqué par le schéma de la figure 4.

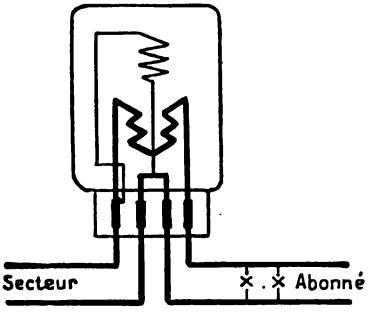


Fig. 4. — Branchement d'un compteur monophasé à 2 fils.

4. — Vérification du compteur comme on l'effectue chez un abonné, avec du courant non déphasé sur la tension (cos φ = 1).

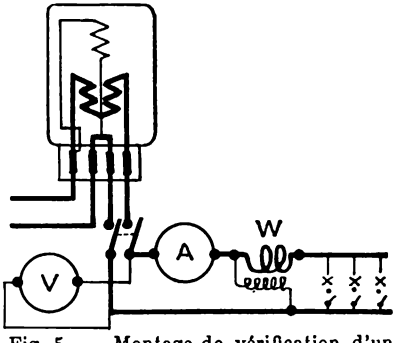


Fig. 5. — Montage de vérification d'un compteur. — L'ampèremètre et le voltmètre ne sont utiles qu'en courant déphasé.

En ligne, après le compteur, on place un wattmètre monophasé étalonné, de manière que les circuits d'intensité du compteur et du wattmètre se suivent (fig. 5). On allume des lampes de l'installation pour obtenir au wattmètre une puissance P watts.

Quand le repère peint sur le disque passe derrière la fenêtre du carter du compteur, on met en marche un chronoscope. On compte *n* tours du disque, puis on arrête le chronoscope. On a ainsi mesuré la durée *t* secondes des *n* tours de disque.

Le compteur a été traversé par une énergie

$$W = \frac{P\,i}{3\,600} \text{ wattheures.}$$

Il a enregistré

$$W_e = K\,n \text{ wattheures.}$$

L'*erreur absolue* sur la mesure est

$$Kn - \frac{P\,t}{3\,600} \text{ wattheures.}$$

et l'*erreur relative*

$$e = \left[Kn - \frac{P\,t}{3\,600}\right] : \frac{P\,t}{3\,600},$$

soit

$$e = \frac{3\,600\,Kn}{P\,t} - 1.$$

Le tableau qui suit contient les lectures faites et l'erreur calculée pour une vérification en surcharge, à charge normale, à demi-charge et au dixième de charge.

VÉRIFICATION DU COMPTEUR ACT 5 N° :...
5 A 110 V K = 0,2 Wh.
Wattmètre électrodynamique n°...

LECTURES			CALCULS		
Puissance fournie P (watts)	Tours du disque. n (tours)	Durée de la mesure. t (secondes)	Énergie fournie. $\frac{Pt}{3\,600}$ Wh	Énergie enregistrée. 0,2 n Wh	Erreur relative
1	2	3	4	5	6
1 000 W	50 t	38,9 s	10,80 Wh	10,0 Wh	— 0,074
500	25	36,2	5,05	5,0	— 0,01
250	12	34,3	2,38	2,4	+ 0,008
50	2	30,4	0,422	0,4	— 0,055

L'erreur reste dans les limites acceptables dans le cas de la charge normale et de la demi-charge, elle est trop grande en surcharge et à faible charge.

5. — Vérification avec du courant déphasé.

Cette vérification est sans intérêt quand tous les récepteurs de l'abonné sont des lampes ou des appareils de chauffage; elle est utile quand l'installation comporte des moteurs et des transformateurs.

On déphase le courant sur la tension en montant *en dérivation*, sur la ligne, des bobines d'inductance et quelques lampes pour régler l'intensité absorbée à la valeur désirée avec un déphasage tel que cos φ soit environ 0,3. Un phasemètre est nécessaire pour vérifier ce déphasage ou un ampèremètre et un voltmètre qui mesurent la puissance apparente, alors que le wattmètre indique la puissance active. L'étalonnage du compteur se fait ensuite comme il a été décrit au paragraphe précédent.

Dans les laboratoires spécialisés pour les essais de compteurs, on préfère employer une puissance fictive. Le circuit intensité du compteur est alimenté par un transformateur à très basse tension auquel on ajoute un rhéostat de réglage. Le circuit tension est branché sur le secteur à la tension nominale.

Pour la vérification en courant déphasé, c'est la tension que l'on déphase par rapport à l'intensité. Le déphaseur employé se compose d'un stator de moteur asynchrone triphasé à l'intérieur duquel le rotor bobiné, qui est immobile, peut être déplacé de tel angle que l'on veut à l'aide d'un secteur denté et d'une vis sans fin (fig. 6).

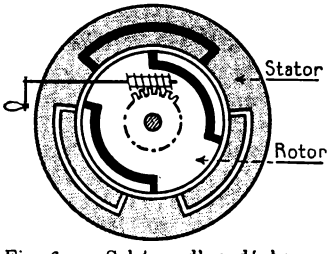


Fig. 6. — Schéma d'un déphaseur de tension.
Les trois bobines du stator reçoivent des courants triphasés du réseau.
Le rotor peut produire, suivant son bobinage, soit du courant monophasé, soit des courants triphasés.

Supposons que le stator soit celui d'un moteur bipolaire. Les courants triphasés qui l'alimentent produisent dans l'entrefer un champ de grandeur constante qui fait le tour complet du rotor pendant une période du courant. Supposons que le rotor soit bobiné en monophasé à deux pôles. Par rapport à l'un des courants statoriques, la tension entre les deux bagues du rotor est déphasée d'un angle qui varie entre les valeurs extrêmes 0 et 2π quand on déplace le rotor d'un tour complet autour de son axe. On fixe le rotor dans la position qui donne le déphasage désiré.

Si le rotor est bobiné en triphasé bipolaire, on obtient entre ses bagues des tensions triphasées et on les déphase à volonté par rapport aux tensions statoriques.

6. — Réglage du compteur ACT 5.

1° *Réglage préliminaire.* — Le disque ne doit pas tourner quand l'intensité est nulle et que la tension seule est appliquée aux bornes de la bobine de tension. S'il tourne, on déplace la plaquette L jusqu'à ce qu'il s'arrête.

2° *Réglage au débit maximum avec courant non déphasé.* — Si le compteur avance, on éloigne l'aimant-frein G de l'axe du disque. Si le compteur retarde, on rapproche G de l'axe.

3° *Réglage au petit débit.* — Quand le réglage préliminaire a été bien fait et si le compteur est en bon état mécanique, l'erreur au faible débit ne dépasse pas ± 0,04. On parfait le réglage à l'aide de la plaque L.

4° *Réglage en courant déphasé.* — Il s'effectue avec la vis H cuivre-maillechort. Ce réglage ne modifie les autres que s'il dépasse ± 0,10. Il faut alors recommencer la vérification et le réglage en courant non déphasé.

Applications.

Vérification et réglage d'un compteur autre que le modèle ACT 5.

Le compteur ACT 5, dont de très nombreux exemplaires sont en service, n'est plus fabriqué. Le constructeur l'a remplacé par le modèle AB7. Mais tout compteur d'induction monophasé peut servir pour la manipulation. La méthode de vérification ne change pas. Les moyens de réglage sont différents; s'il est nécessaire, on consultera la notice du constructeur du compteur qui les indique.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Un compteur ACT 5, ou AB7, 5 A, 110 V. (Compagnie pour la Fabrication des Compteurs, place des États-Unis, Montrouge).
Un wattmètre électrodynamique monophasé, 5 A, 150 V, avec sa fiche d'étalonnage.
Un chronoscope de préférence à une montre à secondes.
Un rhéostat de lampes pouvant absorber 600 watts.
Des bobines de self réglables à noyau de fer.

Note sur le perméamètre Iliovici et l'appareil d'Epstein[1].

I° Mesure de l'induction des tôles en fonction des a-t. magnétisants.

1. — La méthode théoriquement la plus simple consiste à aimanter un tore[2].

Le tore est obtenu en empilant des anneaux de tôle. Sa circonférence moyenne à l mètres de long, sa section est s mètres carrés.

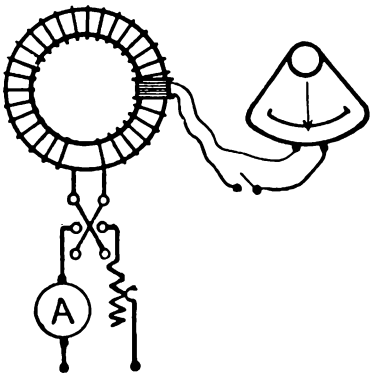


Fig. 1. Montage pour mesurer l'induction produite dans un tore par un courant. Le flux mètre dévie d'une division pour 10^{-4} Weber.

L'enroulement magnétisant comporte n spires enroulées à écartement régulier sur le tore, soit $n_1 = n : l$ spires par mètre. On le fait traverser par un courant de I ampères, le nombre d'ampères-tours par mètre est ainsi n_1 I.

Pour mesurer le flux, un second enroulement de a spires est disposé sur le tore. Il est branché aux bornes d'un fluxmètre ou d'un galvanomètre balistique étalonné (fig. 1).

En inversant le courant magnétisant, l'appareil de mesure indique une variation de flux de 2 Φ *webers*.

Le flux dans la section du tore est $\Phi : a$ et l'induction dans le fer a pour valeur $B = \frac{\Phi}{as}$. *Tesla ou Weber par m²*.

1. Les mesures des quantités magnétiques ne sont pas du programme des lycées techniques. Elles ne sont utiles que dans les Usines de constructions électriques et dans les Aciéries qui fabriquent les tôles spéciales pour constituer les circuits magnétiques des machines et des appareils électriques. L'UTE (NF C 28.900) prescrit l'emploi du perméamètre pour la détermination industrielle de l'induction en fonction du nombre d'ampères-tours par mètre magnétisants. Les perles totales dues à l'aimantation alternative doivent être déterminées avec l'appareil d'Epstein.

A titre de renseignement, nous donnons le principe de ces mesures sans en faire l'objet de manipulations.

2. ***Électricité industrielle, Lois générales :*** 38e leçon.

Une série de mesures pour diverses valeurs de I fournit les résultats nécessaires pour le tracé de la courbe de B en fonction de $n_1 I$.

Cette méthode n'est pas employée industriellement :

1° elle nécessite beaucoup de tôles pour y découper les anneaux du tore;

2° elle oblige à effectuer à la main le bobinage magnétisant et le bobinage de mesure pour chaque tore fabriqué.

2. — En se servant d'éprouvettes droites, on ne peut éviter des entrefers dans le circuit magnétique.

Quand on adapte une culasse C_1 à l'éprouvette E pour fermer le circuit magnétique (fig. 2), deux entrefers e_1 et e_2 existent aux joints. Supposons que ces entrefers aient chacun 0,05 millimètre soit pour les deux 0,0001 m. Dans le cas d'une induction de 1 *Tesla*, ils nécessitent au total

$$800\,000 \times 0{,}0001 = 80\ At.$$

soit autant que l'aimantation d'une longueur de 16 centimètres de tôles. De plus, ce nombre est incertain parce que la longueur des entrefers, qui varie avec le soin apporté à l'ajustage de l'éprouvette sur la culasse, ne peut être mesurée avec précision. La détermination des ampères-tours employés uniquement à l'aimantation de l'éprouvette devient donc impossible.

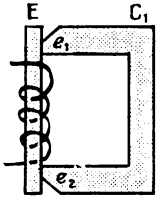


Fig. 2. — Il existe deux entrefers dans le circuit magnétique, aux joints de l'éprouvette E et de la culasse C_1.

3. — Avec le perméamètre Iliovici l'influence des joints magnétiques est éliminée de la mesure.

Le circuit magnétique de l'appareil comprend l'éprouvette E et la culasse C_1 (fig. 3).

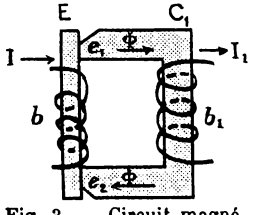


Fig. 3. — Circuit magnétique principal du perméamètre Iliovici : la bobine *b* produit le flux Φ dans l'éprouvette, la bobine b_1 produit le même flux Φ dans la culasse et les entrefers.

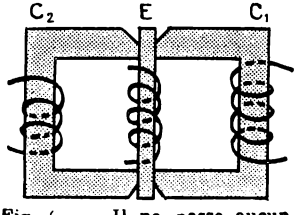


Fig. 4. — Il ne passe aucun flux dans la culasse C_2 quand le perméamètre est réglé.

L'éprouvette, longue d'environ 20 centimètres et d'une section voisine de 1 centimètre carré, est faite en empilant un nombre pair

de bandes de tôle découpées en nombre égal dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire. Elle est placée dans une bobine b dont le nombre de spires par mètre est $n_1 = 7\,960$ parcourue par un courant réglable I.

La culasse feuilletée C_1 porte aussi une bobine b_1 dans laquelle un courant I_1 est réglé par un rhéostat.

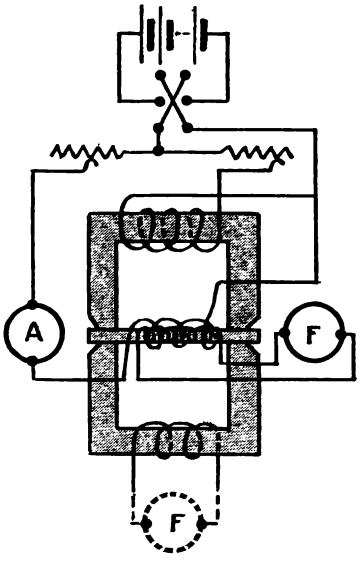


Fig. 5. — Schéma d'ensemble du perméamètre Iliovici.

Pour effectuer une mesure, le réglage consiste à produire à la fois :

1° dans la bobine b, un nombre d'ampères-tours par mètre déterminé $n_1 I$. Désignons par Φ le flux, dont la valeur n'est pas connue, dans l'éprouvette E;

2° dans la bobine b_1, le nombre d'ampères-tours juste nécessaires à la production du flux Φ dans les entrefers e_1 et e_2 et dans la culasse C_1.

Quand ce résultat est obtenu, aucune partie du flux n'est dérivée dans une seconde culasse C_2 en dérivation sur l'éprouvette et la culasse C_1 (fig. 4). On le vérifie en inversant simultanément les courants I et I_1 et en constatant avec un fluxmètre ou un galvanomètre balistique qu'aucune f. é. m. n'est induite dans une bobine b_2 entourant la culasse C_2, ce qui prouve que le flux dans C_2 est nul [1].

L'effet sur le flux Φ des joints et de la culasse C_1 est alors *compensé* par la bobine b_1. *Ni la culasse C_1, ni les entrefers e_1 et e_2 n'interviennent plus dans la mesure.* Tout se passe comme si l'éprouvette E formait un tore fermé sur lui-même et aimanté par $n_1 I$ ampères-tours par mètre.

Pour mesurer le flux Φ on branche le fluxmètre ou le balistique sur un enroulement de

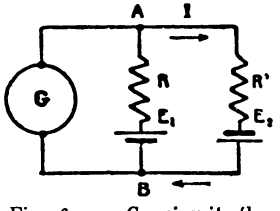


Fig. 6. — Ce circuit électrique est comparable au circuit magnétique du perméamètre Iliovici.

1. Le circuit magnétique du perméamètre est comparable au circuit électrique de la figure 6. Dans ce circuit, le courant I est produit par les f. é. m. en série E_1 et E_2. Supposons que l'on puisse ajuster E_2, pour obtenir que les points A et B soient au même potentiel, condition réalisée quand le galvanomètre G n'indique aucun courant. Dans la branche ARE_1B, on a alors $E_1 = RI$: la f. é. m. E_1 produit le courant I dans la portion de circuit ARE_1B comme si ce circuit était fermé sur lui-même.

N spires (N = 25 ou 100), placé autour de l'éprouvette et on inverse simultanément les courants I et I_1 (fig. 5).

L'appareil mesure une variation de flux $\Delta\Phi$ telle que

$$\Delta\Phi = 2\,N\Phi.$$

En désignant par s la section de l'éprouvette, l'induction est

$$B = \frac{\Delta\Phi}{2\,Ns}\ T \qquad ou \qquad Wb/m^2$$

elle résulte de $n_1 I$ ampères-tours magnétisants par mètre.

Par exemple, une mesure a fourni les résultats suivants : I = 0,3 A; $s = 1\ cm^2$; déviation du fluxmètre 73 divisions pour N = 25 spires.

Donc $n_1 I = 7\,960 \times 0{,}3 = 2\,388\ At/m$

$\Delta\Phi$ a pour valeur

$$B = \frac{\Delta\Phi}{2\,Ns} = \frac{73\ 10^{-6}}{2 \times 25 \times 10^{-4}} = 1{,}46\ Tesla.$$

La précision de la mesure est de l'ordre de 0,01.

2° Mesure des pertes totales dues à l'effet d'un flux alternatif.

1. — Principe de l'opération.

On constitue un circuit magnétique fermé avec les tôles à essayer. Dans ce circuit, on produit une induction maximum déterminée avec un courant alternatif sinusoïdal de fréquence 50 périodes par seconde. On mesure au wattmètre la puissance consommée pour cette aimantation alternative; elle comprend à la fois les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. On exprime ces pertes totales en watts par kilogramme de tôles essayées.

2. — Description de l'appareil d'Epstein.

L'éprouvette est constituée par quatre paquets de bandes de tôle de 30 × 500 millimètres découpées en nombre égal dans le sens du laminage et dans le sens perpendiculaire. Ces bandes sont isolées l'une de l'autre par du papier, du vernis ou simple oxydation comme dans la construction électrique normale. On assemble les quatre paquets pour réaliser un circuit magnétique fermé d'environ 9 cen-

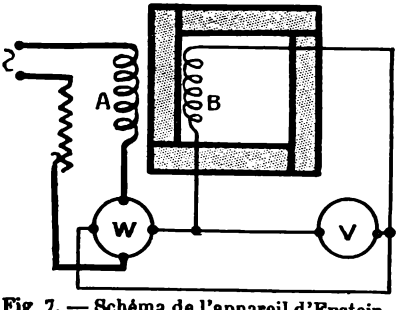


Fig. 7. — Schéma de l'appareil d'Epstein. Les deux enroulements A et B sont répartis sur les quatre branches de l'éprouvette.

timètres carrés de section (fig. 7). Il est inutile de soigner les joints magnétiques, on en verra la raison plus loin.

Les quatre branches de cette carcasse sont enfilées dans quatre bobines qui portent deux enroulements.

L'un est l'enroulement magnétisant. Il est fait de N = 190 × 4 spires de fil assez gros. Il est branché sur une prise de courant alternatif avec, en série, un rhéostat de réglage et la bobine d'intensité d'un wattmètre.

L'autre enroulement en fil fin, placé sous le précédent, comprend le même nombre de spires, N = 190 × 4. Il sert à mesurer la tension induite par le flux alternatif. Il est connecté à un voltmètre V et au circuit de tension du wattmètre.

3. — Exécution d'une mesure.

On règle le courant d'aimantation pour obtenir dans l'enroulement en fil fin la tension qui correspond à l'induction que l'on désire produire.

Rappelons la règle connue : *pour la fréquence* 50 *hertz, un noyau de section* 100 *centimètres carrés, une induction maximum* $B_m = 1$ *Wb/m²*, *la f. é. m. efficace produite dans une spire est* 2,22 *volts.*

Donc, pour que l'induction maximum atteigne *1 Wb/m²* dans le fer dont la section est 9 centimètres carrés, puisque l'enroulement en fil fin compte N = 190 × 4 spires, il faut régler le rhéostat pour que le voltmètre indique

$$U = 2{,}22 \times \frac{9}{100} \times 190 \times 4 = 151{,}8 \text{ volts.}$$

Pour atteindre $B_m = 1{,}4$ *Wb/m²* il faut obtenir :

$$U' = 2{,}22 \times \frac{9}{100} \times 190 \times 4 \times \frac{14\,000}{10\,000} = 212{,}6 \text{ volts.}$$

Le wattmètre indique une puissance W watts. A quoi correspond cette puissance? Dans l'appareil d'Epstein les pertes sont :

1° des pertes en chaleur Joule dans l'enroulement primaire magnétisant;

2° des pertes magnétiques par hystérésis et courants de Foucault.

Les pertes en chaleur Joule résultent de la chute ohmique de tension dans l'enroulement primaire. Or, la tension appliquée au wattmètre est fournie par l'enroulement secondaire qui possède le même nombre de spires que le primaire : c'est la tension primaire diminuée de la chute ohmique. Donc les pertes dues à la résistance électrique de l'enroulement primaire ne sont pas comprises dans la puissance mesurée au wattmètre, puissance qui correspond seulement aux pertes magnétiques.

Puisqu'il ne se produit pas de pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les entrefers, il est inutile de soigner l'ajustage des joints du circuit magnétique. Peu importe que le courant magnétisant soit plus ou moins intense.

Le wattmètre mesure la puissance active dépensée pour l'aimantation; mais la puissance réactive est relativement grande, le facteur de puissance est très faible, de l'ordre de cos φ — 0,05[1]. Un wattmètre de construction spéciale[2] est nécessaire pour la mesure parce que les wattmètres ordinaires manquent de précision quand le facteur de puissance du récepteur est inférieur à 0,2.

Le circuit magnétique est pesé et les pertes sont calculées par kilogramme.

L'essai normal qui caractérise une qualité de tôle est effectué pour l'induction maximum $B_m = 1\ Wb/m^2$. Parfois on y ajoute une mesure à $0,7\ Wb/m^2$ et une autre à $1,4\ Wb/m^2$ (fig. 8).

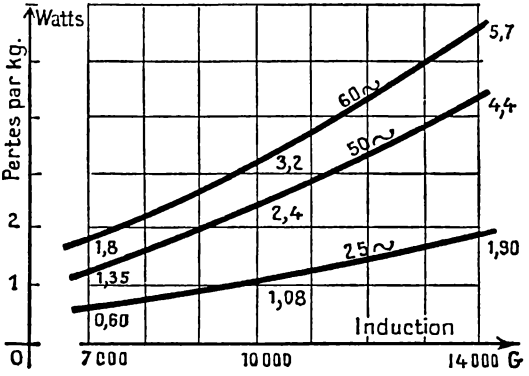


Fig. 8. — Pertes totales en watts par kilogramme dans une tôle dite « Qualité supérieure » d'épaisseur 50/100 en fonction de l'induction pour différentes fréquences. Se rappeler que 1 Wb/m^2 est égal à 10 000 *Gauss*.

Par exemple, avec des tôles dites de « Qualité supérieure », épaisses de 50/100, les pertes par kilogramme à la fréquence de 50 *hertz* ont été trouvées de :

1,35 watt à 0,7 Wb/m^2 ou *tesla*.
2,40 watts à 1 —
4,40 watts à 1,4 —

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles au nombre de cycles d'aimantation par seconde, c'est-à-dire à la fréquence, pour une induction déterminée et un poids de fer constant. Dans les mêmes conditions, les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence.

Désignons par H et F ces pertes par kilogramme pour $B_m = 1\ Wb/m^2$ à la fréquence 50 *hertz* et proposons-nous de les calculer. Une mesure à l'appareil d'Epstein donne $P = H + F$ (1)

Une autre mesure, à la fréquence f, pour la même induction maximal donne

$$p = H \times \frac{f}{50} + F \times \frac{f^2}{50^2} \qquad (2)$$

Avec les équations (1) et (2) on peut calculer H et F.

Par exemple, les tôles « Qualité supérieure » perdent 2,4 watts par kilogramme à 50 *hertz* pour $B_m = 1$ *tesla* et 1,08 *watt par kilogramme* à 25 *hertz*, d'où $H = 1,92\ W/kg$ et $F = 0,48\ W/kg$.

1. ***Électricité industrielle.*** *Lois générales :* 64e leçon.
2. La bobine d'intensité est réalisée avec des fils fins, isolés et toronés.

Redressement des courants[1]

Le redressement consiste à obtenir un courant toujours de même sens à partir d'un réseau à tension alternative.

1. — Les diodes.

Le redressement est obtenu par des ***diodes*** (symbole fig. 1), éléments qui n'autorisent le passage du courant dans un seul sens. Il existe deux types principaux de diodes.

a) Les diodes à vide.

b) Les diodes à semi-conducteurs.

Les diodes ***à vide*** sont constituées par une enceinte bien vidée dans laquelle se trouvent une ***cathode chaude***, qui émet des électrons, et une ***anode*** qui les reçoit : le courant ne peut passer que dans le sens conventionnel anode-cathode. Pour le sens inverse la diode à vide se comporte comme une résistance pratiquement infinie : le courant est nul quelle que soit la tension dite ***inverse*** qui est appliquée.

Les diodes à semi-conducteurs sont entièrement solide : elle comporte une ***jonction*** entre semi-conducteurs de type opposé N et P. On utilise le germanium pour les petites puissances, le silicium pour les fortes puissances.

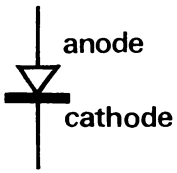


Fig. 1.

Pratiquement une diode est caractérisée par :

le courant maximal qu'elle peut supporter dans le sens direct.

la tension inverse qu'elle peut supporter dans le sens inverse.

Les diodes à semi-conducteurs sont en plein développement; elles ont déjà pratiquement remplacé les diodes à vide (sauf pour les très hautes tensions). Elles atteignent les puissances élevées de l'industrie (locomotives, laminoirs). Elles sont cependant sensibles à la température et doivent être convenablement refroidies.

1. Voir Notions d'Électroniques... Delagrave.

Redressement monophasé simple.

Étudions le redressement sur résistance pure avec une diode D. I. (400 mA direct maximal; 400 V inverse maximale).

a) **Réaliser le montage** (fig. 2). Les condensateurs C_1, C_2, C_3 seront

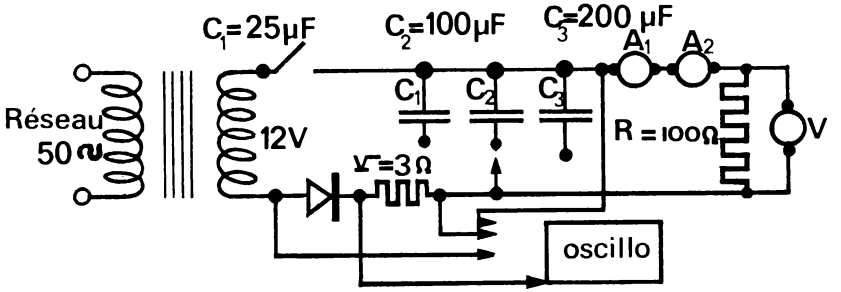


Fig. 2.

connectés ultérieurement. Les appareils V et A_1 sont des appareils à aimants : ils mesurent des valeurs moyennes. L'ampèremètre A_2 est un appareil à fer doux : il mesure le courant efficace. La résistance *r* est utilisée en shunt : la tension à ses bornes est proportionnel au courant dans la diode.

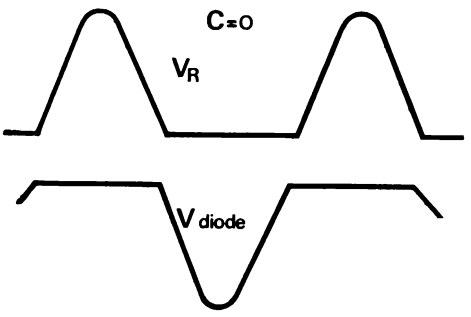


Fig. 3. — Sans condensateur le courant passe dans la diode et la résistance R une alternance par période.

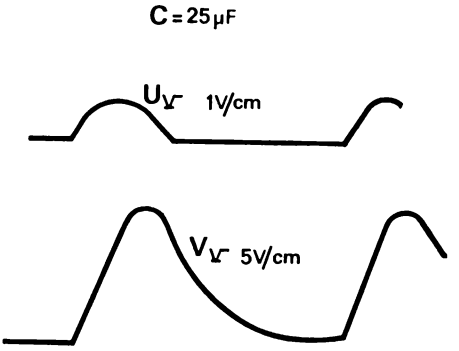


Fig. 4. — Avec le condensateur le courant dans R dure plus d'une alternance.

b) **Fermer l'interrupteur.** Relever les indications des appareils de mesure. Examiner à l'oscillographe la tension aux bornes de R et la tension aux bornes de la diode fig. 3. Expliquer l'écart entre la valeur moyenne et la valeur efficace du courant.

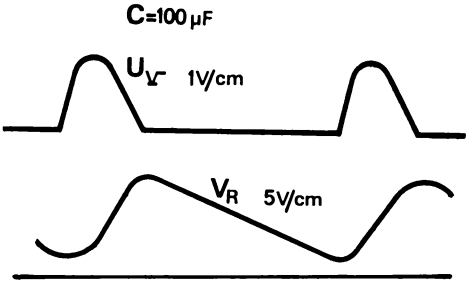


Fig. 5. — Le courant dans R est devenu continu, alors que le temps d'ouverture de la diode a diminué.

c) **Connecter ensuite C_1.** Relever les indications des appareils de mesure. Examiner à l'oscillographe le courant dans R (par la tension aux bornes de R) et le courant dans la diode par la tension aux bornes de *r*) (fig. 3). Expliquer pourquoi les indications de A_1 et A_2 se rapprochent.

d) Recommencer en connectant C_2, puis C_3.

Redressement par diode contrôlée : thyristor.

Une diode simple devient conductrice dès qu'une tension lui est appliquée dans le sens direct. Une ***diode contrôlée*** comporte une électrode qui commande le passage de l'état bloqué à l'état conducteur. Bien entendu la diode ne peut être débloquée que si la tension à ses bornes est dans le sens direct.

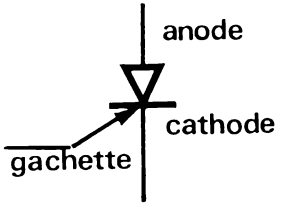


Fig. 6. — Représentation schématique d'un thyristor.

Un ***thyristor*** (fig. 6) est une diode à semi-conducteur commandée par une électrode dite gachette. La gachette constitue avec la cathode une petite diode supplémentaire : le déblocage du courant redressé anode-cathode s'obtient en envoyant un courant gachette-cathode. Lorsque le thyristor a été ainsi débloqué, il reste conducteur quel que soit le courant de gachette : le courant anode cathode persiste jusqu'à ce que la tension anode-cathode ***s'inverse.*** Ainsi à chaque alternance positive, la gachette doit débloquer le thyristor et, en réglant l'instant de ce déblocage dans l'alternance, on fait varier le courant redressé.

a) **Réaliser le montage** (fig. 7).

Le thyristor utilisé est le TR 4015 (Cosem Silec). La tension alternative est la tension du réseau (220 V.50). Le récepteur R est un rhéostat de 12 lampes.

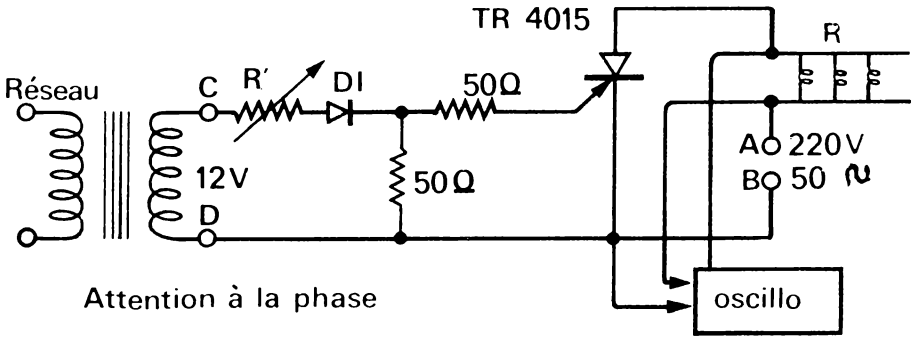


Fig. 7. — Schéma du redressement contrôlé.

Le courant de gachette est obtenu à partir du réseau par un petit transformateur 220/12 qui débite dans les deux résistances en série R′ (100 Ω variable) et 50 Ω. La tension aux bornes de cette dernière est envoyée à la gachette avec une résistance de protection de 50 Ω. La diode DI (voir 1re partie de la manipulation) empêche l'inversion de la tension de gachette.

Le thyristor se débloque lorsque la tension de gachette atteint une certaine valeur. En faisant varier par R′ la valeur maximale de la tension de gachette, on fait varier l'instant de déblocage donc le courant (moyen et efficace) dans R (fig. 8).

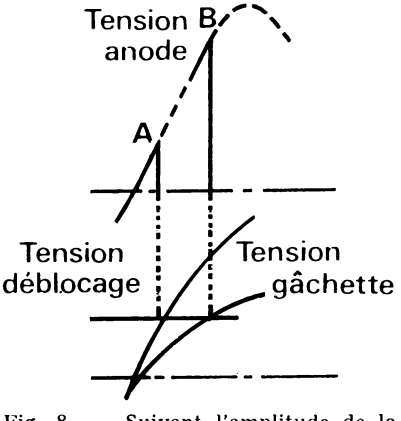


Fig. 8. — Suivant l'amplitude de la tension gâchette le déblocage se produit en A ou en B.

Attention. — La tension d'alimentation de gachette, donc la tension de sortie CD du petit transformateur 220/12 doit être en ***phase*** avec la tension AB fournie directement par le réseau. S'il y a opposition, la gachette ne devient positive

que lorsque la tension d'anode est négative et il n'y a pas déblocage quelle que soit la résistance R'. Si on constate ce fait c'est qu'une erreur de phase s'est produite : pour la corriger il suffit d'inverser les connexions soit au primaire, soit au secondaire du transformateur 220/12.

b) **Donner à R' divers valeurs** à partir de zéro et pour chaque réglage relever la tension (moyenne et efficace) et le courant (moyen et efficace) dans la résistance de charge R.

N. B. Les voltmètres et ampèremètres nécessaires n'ont pas été indiqués sur le schéma que l'on complètera. Choisir les types d'instruments convenant aux mesures que l'on veut effectuer.

c) **Examiner à l'oscillographe** la tension aux bornes de la résistance de charge et la tension aux bornes du thyristor (fig. 9).

Remarques.

a) Les semi-conducteurs sont très sensibles à la température. Dans cette manipulation il faut monter le TR 4015 sur un ***« refroidisseur »***. C'est une pièce métallique que l'on se procure chez les fournisseurs de semi-conducteurs; elle favorise la dissipation de la chaleur et maintient ainsi la température à une valeur tolérable pour le thyristor.

b) La commande de la gachette utilisée dans cette manipulation a été choisie pour sa simplicité. Mais elle est très imparfaite. Le retard au déblocage ne peut en effet dépasser un quart de période : il est donc impossible de régler jusqu'à zéro le courant de charge. De plus, surtout lorsque le retard s'approche de sa limite, l'instant de déblocage est imprécis.

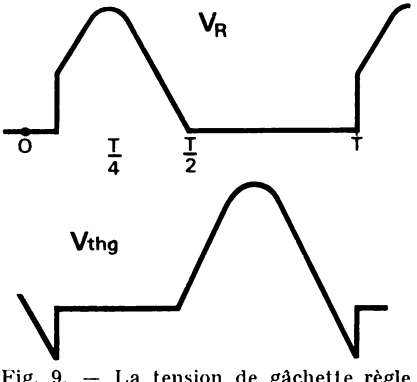


Fig. 9. — La tension de gâchette règle l'instant de déblocage entre O et T/4.

On préfère la commande par brève impulsion de courant sur la gachette : en faisant varier l'instant de cet impulsion de 0 à T/2 on obtient un réglage progressif du courant de travail d'une valeur maxima (utilisation de l'alternance positive toute entière) à des valeurs très petites (déblocage en fin d'alternance).

Ces montages à impulsions utilisent des semi-conducteurs tel que les transistors uni-jonction.

Matériel nécessaire à la manipulation.

Une diode DI.
Un transformateur 12 V secondaire.
3 Capacités 25μ F, 100 μ F, 200 μ F.
2 résistances : 3 Ω et 100 Ω.
Ampèremètres à cadre et ferro magnétique.
Voltmètre à cadre 15 V.
1 oscillographe (bi courbe de préférence).
Un thyristor TR 4015.
Un rhéostat de lampes.
2 résistances de 50 Ω.

L'amplification : Triode. Transistor.

1. — Propriétés du tube triode.

Une triode est un tube électronique comportant trois électrodes : une cathode chauffée qui émet des électrons, une anode positive qui les attirent et une grille négative qui gêne plus ou moins le passage des électrons de la cathode à l'anode.

Le courant anodique I_a dépend donc de la tension anode-cathode dite tension anodique V_a et de la tension grille-cathode dite tension de grille V_g.

Il dépend aussi de la température de la cathode; donc en fait de la tension de chauffage, qui, pour un emploi normal, doit être maintenue à la valeur indiquée par le fabriquant.

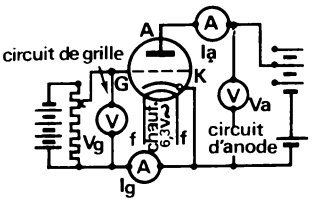


Fig. 1. — Montage pour relever les caractéristiques d'un triode. Les sources de tension peuvent être fournies par une alimentation stabilisée.

2. — Des familles ou réseaux de courbes résument les propriétés de la triode.

Le plus usuel est le réseau des courbes représentant le courant anodique I_a en fonction de la tension anodique V_a pour diverses valeurs fixées de la tension grille V_g : c'est le réseau des caractéristiques d'anode[1] (fig. 2).

Il est aussi intéressant de connaître le courant grille en fonction de la tension grille : ce sont les caractéristiques de grille. Ces courants sont toujours très petits de l'ordre du microampères, alors que les courants anodique sont de l'ordre des dizaines de milliampères.

2. — Montage d'étude d'une triode.

Nous utilisons une triode 6J5, tube assez ancien mais pratique en manipulations. Schématisons le montage figure 1; nous y distinguons :

1° un ***circuit de chauffage***, ce circuit est alimenté en alternatif, à

1. Ces caractéristiques sont toujours établies pour la tension de chauffage imposée par le constructeur.

partir du réseau, par l'intermédiaire d'un transformateur donnant une tension secondaire de 6,3 *volts*. Complètement indépendant des autres circuits, le circuit de chauffage n'est pas représenté complètement sur la figure;

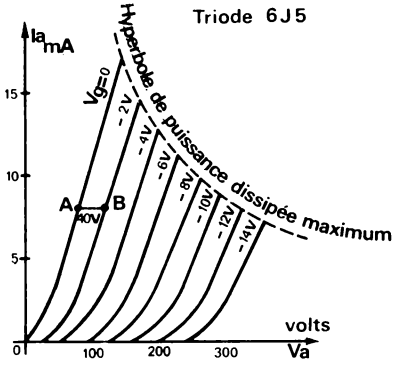


Fig. 2. — Réseau des caractéristiques d'anode.

2° un ***circuit d'anode*** comprenant une ***source de tension anodique*** qui porte l'anode à un potentiel ***positif*** réglable;

3° un ***circuit de grille*** comprenant une ***source*** dite ***de polarisation*** qui porte la grille à un potentiel ***négatif*** réglable.

Des appareils de mesures nous donnent les valeurs de V_a, V_g, I_a et éventuellement le courant de grille I_g (microampèremètre)[1].

Il n'est pas inutile de contrôler la tension de chauffage (alternative).

Il est pratique d'utiliser comme source de tension anodique et comme source de polarisation un redresseur vendu dans le commerce sous le nom d'***alimentation stabilisée.*** Il importe en effet que ces tensions restent constantes pendant les mesures.

3. — Caractéristiques d'anode.

Avant de commencer les mesures, indiquons les valeurs maximales données par le constructeur :

courant anodique = 20 *m*A; tension anodique = 350 V;
puissance dissipée sur l'anode = 2,5 W.

Ces valeurs ne devront pas être dépassées pendant les mesures.

Fixons la tension grille, $V_g = -2$ volts par exemple, et donnons à la tension anodique des valeurs croissantes. Relevons pour chaque valeur de V_a la valeur correspondante de I_a et portons nos résultats sur un graphique figure 2.

L'ensemble des courbes obtenues pour diverses valeurs de V_g : 0, — 2, — 4, — 6, — 8, — 10, — 12, — 14 *volts*, forme le réseau des caractéristiques d'anode figure 2.

Les valeurs sont limitées par l'hyperbole de puissance maximale $V_a \times I_a = 2{,}5$ que vous tracerez sur votre graphique avant même de commencer l'expérimentation.

1. Les milliampèremètres et microampèremètres sont des appareils fragiles : vous aurez soin de les employer d'abord avec leur plus grand calibre de mesure et de ne changer de calibre qu'après vous êtes assuré que le courant à mesurer n'excède pas le nouveau calibre.

4. — Amplification par la triode.

Réaliser le montage (fig. 3).

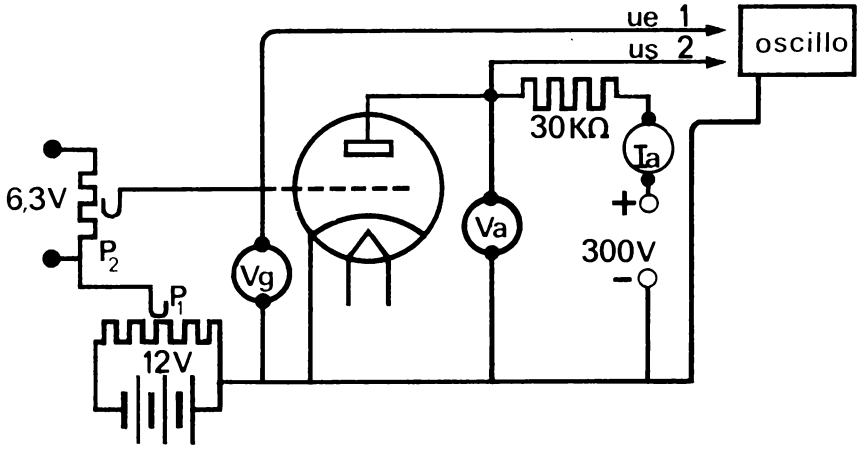


Fig. 3. — Montage d'amplification. La résistance 30 k Ω est la résistance de charge. Vérifier sa valeur avant montage.

La tension grille est la somme de la tension continue négative dite tension de polarisation prise sur le potentiomètre P_1 et d'une tension alternative u_e prise sur le potentiomètre P_2 dite tension d'entrée.

a) **La tension alternative u_e étant nulle**, régler par le potentiomètre P_1 la tension de polarisation à — 6 V. Relever I_a et V_a. Placer ce point de fonctionnement, dit de repos, sur le réseau des caractéristiques d'anode.

b) **Établir** par le potentiomètre P_2 **une petite tention alternative** d'entrée (1 V) et examiner à l'oscillographe les composantes alternatives de la tension grille (u_e) et de la tension anodique (tension de sortie u_s). Calculer le gain en tension u_s/u_e.

c) Recommencer pour des valeurs croissantes de la tension d'entrée et observer la déformation de la tension de sortie.

d) **Tracer sur le réseau** des caractéristiques la droite passant par le point de fonctionnement à vide et le point d'abscisse 300 V sur l'axe des V_a. Lorsque la grille est attaquée par la tension alternative, le point de fonctionnement oscille sur cette droite dite droite de charge autour du point de repos. Vérifier les mesures faites à l'oscillographe.

5. — L'effet transistor.

Un transistor est formé de deux diodes à jonction ayant même base :

une diode dite émetteur-base (EB) et une diode dite collecteur-base (CB) (fig. 4).

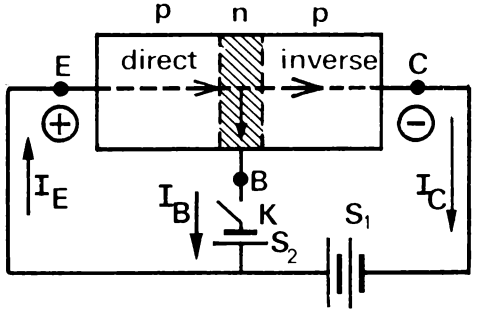


Fig. 4. — $I_E = I_C + I_B$; I_B est beaucoup plus petit que I_C; I_C est presque égal à I_E.

Lorsque l'interrupteur K est ouvert la polarité de la source d'alimentation S_1 place la diode CB dans le sens bloqué : il ne passe que le courant inverse (très petit) de cette diode.

Fermons l'interrupteur K : la source S_2 produit à travers la diode EB un courant direct I_E dont une ***petite partie*** I_B sort par B et dont la majeure partie traverse la 2e diode CB dans le sens inverse et sort par C en donnant le courant collecteur I_C. Cet effet, d'apparence paradoxale, est l'effet transistor.

Grâce a lui le courant I_B entraîne un courant I_C plusieurs dizaines de fois plus grand que lui. Il commande le courant I_C comme la tension grille de la triode commande le courant anodique.

La différence essentielle avec la triode, c'est que la grille de la triode effectue la commande avec un courant pratiquement nul alors que la base du transistor commande en absorbant un courant petit mais non non nul : la commande exige une certaine puissance.

6. — Caractéristiques du transistor (Émetteur commun).

Un transistor peut être utilisé de plusieurs façons différentes.

La plus usuelle est celle dite émetteur commun (EC), représentée par la figure 5 : l'électrode de commande est la base B, le courant commandé sort par le collecteur C. Au sens des courants près on peut dire que, comparativement à la triode, l'émetteur joue le rôle de la cathode, le collecteur celui de l'anode, la base celui de la grille.

Le transistor utilisé est le OC 72 pour lequel I_C est de l'ordre de 50 fois I_B; la tension V_{CB} ne doit pas dépasser 15 V et la ***puissance*** $I_C \times V_{CB}$ ***ne doit pas dépasser 0,165 W*** à 20° C (les transistors sont très sensibles à la température).

a) **Réaliser le montage** (fig. 5).

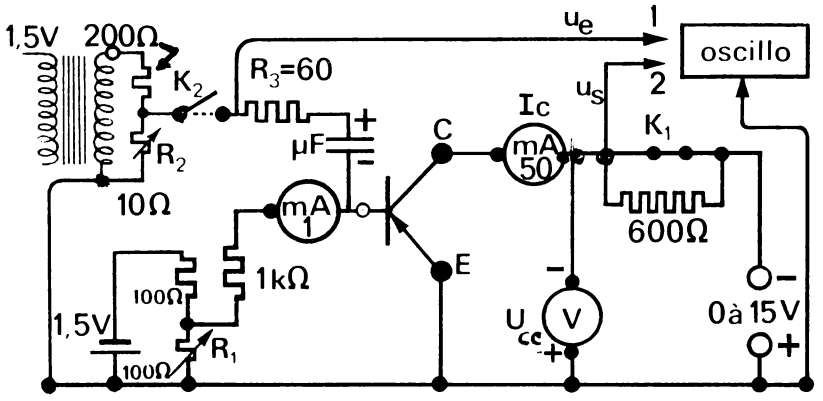


Fig. 5. — Pour le relevé des caractéristiques, les interrupteurs K_1 et K_2 sont dans les positions traits forts; pour l'étude de l'amplification, dans les positions pointillées.

La tension V_{CB} (0 à 15 V) est commodément fournie par une alimentation stabilisée réglable. On peut aussi utiliser une pile avec un dispositif potentiomètrique.

Faire très attention aux polarités.

b) K_1 étant fermé et K_2 ouvert, ***faire varier la tension V_{CE} à partir de zéro*** et relever I_C en fonction de V_{CE}, I_B étant maintenu constamment égal à 0,1 *m*A par la manœuvre de la résistance R_1.

Tracer la courbe représentant I_C fonction de V_{CE} : c'est la caractéristique de sortie pour I_B = 0,1 *m*A. Recommencer pour I_B = 0,2 puis 0,3, 0,4, 0,5 *m*A.

Attention. — Il ne faut pas dépasser la puissance maximal 0,165 W. Pour cela tracer à l'avance l'hyperbole $I_C \times V_{CE}$ = 0,165 W et reporter chaque point immédiatement après la mesure.

7. — Amplification par transistor (E. C.).

En fermant l'interrupteur K_2 nous appliquons la petite tension alternative à amplifier u_e qui règne aux bornes de la résistance R_2, à l'ensemble résistance R_3 + condensateur + résistance entre B et E le tout en série. L'impédance du condensateur est négligeable; le total R_3 + résistance B à E est de l'ordre de 100 Ω. Au courant de base produit par la pile de polarisation nous ajoutons ainsi un courant alternatif $i_e = u_e/100$ qui provoque une composante alternative beaucoup plus grande dans le courant du collecteur.

En ouvrant l'interrupteur K_1 nous introduisons la résistance de charge 600 Ω dans le circuit collecteur. C'est la composante alternative aux bornes de cette résistance qui est la tension de sortie u_s. Le gain en tension est

$$G = u_s/u_e.$$

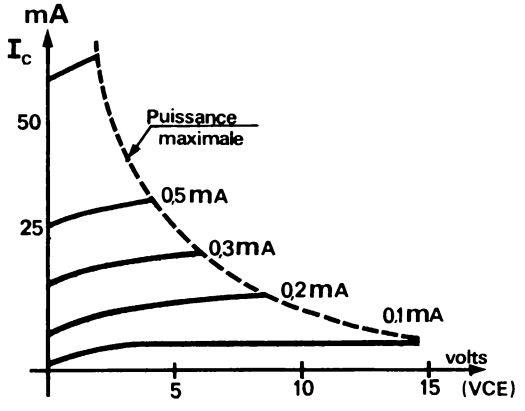


Fig. 6. — Réseau de caractéristiques de sortie. Montage EC.

a) Fixer la tension d'alimentation à 15 V. Ouvrer l'interrupteur K_1 et régler par R_1 la polarisation de la base de façon à obtenir un courant $I_C = 15$ *m*A.

Placer le point de fonctionnement (repos) sur le réseau des caractéristiques. Tracer la droite de charge.

b) R_2 étant amené à zéro, fermer l'interrupteur K_2. Donner à R_2 une petite valeur (1 Ω). ***Observer et mesurer à l'oscillographe*** u_e et u_s. Calculer le gain en tension.

Placer sur la droite de charge les points correspondants à l'amplitude maximum (positive et négative) de u_s. En déduire les valeurs maximale et minimale du courant de base. Vérifier les ordres de grandeur.

c) Recommencer pour des valeurs croissantes de R_2. Observer la distorsion pour les grandes valeurs de u_e.

Matériel nécessaire pour la manipulation.

Une triode 6 J 5 et son support.
Une alimentation stabilisée et une pile de polarisation.
Un voltmètre à cadre mobile 1 000 Ω/V, 300 V.
Un voltmètre à cadre mobile 10 000 Ω/V, 15 V.
Un voltmètre ferromagnétique 15 V.
Un milliampère à cadre mobile 100 mA.
Un micro ampère 1 000 Ω A.
Un oscillographe (bi courbe de préférence).
Un transistor OC 72.
Un transformateur 1,5 V au secondaire.
Une pile de polarisation 1,5 V.
2 Résistances variables 10 Ω et 100 Ω.
5 Résistances fixes 200 Ω, 100 Ω, 1 k Ω, 60 Ω, 600 Ω.
Un condensateur 1 000 μ F.

2e PARTIE

ESSAIS DE MACHINES

Quelques observations générales sur les essais de machines.

1. — L'installation d'une salle d'essais de machines électriques.

1° La salle est alimentée par le secteur en triphasé. Le courant continu est fourni soit par un groupe tournant, soit par une batterie d'accumulateurs, soit directement par redresseurs.

Tous ces courants sont envoyés par un tableau général de couplage à des tableaux de distribution à bornes, situés auprès de chaque poste de manipulation. Ces tableaux comportent des interrupteurs et des fusibles. Le même tableau de couplage assure en outre la distribution de courants exceptionnels tels que 400 et 1 000 Hz, fréquence variable de 40 à 60 Hz etc.

2° Les machines en essai sont placées sur des blocs de béton portant des rainures en T. L'accouplement est fait soit directement, soit par courroies.

Lorsque les machines tournent à la même vitesse, l'accouplement direct est à conseiller. Il exige cependant un alignement soigné.

Parmi les divers genres de courroies la courroie plate mince sans joint est la meilleure : le glissement est pratiquement nul et la perte de puissance très faible.

Il est commode de munir chaque machine d'une poulie de diamètre tel que, à la vitesse nominale, la vitesse tangentielle ait une valeur unifiée : une poulie par machine est alors suffisante pour l'accouplement de deux machines quelconques.

3° Les appareils de mesure sont placés sur une tablette mobile que l'on approche des blocs de béton. Cette menuiserie porte sur la face avant deux rhéostats d'excitation et deux rhéostats qui servent soit de rhéostat de démarrage, soit de rhéostat de charge.

Il est bien évident que l'installation peut être plus ou moins perfectionné suivant les moyens financiers dont on dispose. En particulier il est très commode de munir chaque poste de travail d'une tension continue réglable. Elle est avantageusement fournie par un groupe Léonard. Les dispositifs à thyristors permettant le réglage profond et la récupération sont encore onéreux (1967) et les courants qu'ils fournissent présentent des difficultés d'autant plus grandes que le réglage est plus profond.

2. — Les épreuves auxquelles il est possible de soumettre une machine électrique sont nombreuses.

Supposons qu'il s'agisse d'essayer une génératrice à courant continu. Il est possible :

1° de mesurer les *résistances* de l'induit et des inducteurs;

2° de relever la *caractéristique à vide* : c'est la courbe $E = f(i)$ de la f. é. m. en fonction du courant d'excitation, à vitesse constante et courant débité nul;

3° de relever la *caractéristique en charge* : c'est la courbe $U = F(\ )$

Fig. 1. — Une salle d'essais de machines électriques.

de la tension aux bornes en fonction du courant débité à vitesse et excitation constante;

4° de tracer, à partir des caractéristiques à vide et en charge, telles autres *caractéristiques* désirées, comme celles de *réaction d'induit* ou *de réglage*;

5° de déterminer le *rendement* par la méthode des pertes séparées;

6° de mesurer l'*échauffement* quand la machine en charge a atteint son équilibre de température;

7° d'essayer la *rigidité diélectrique des isolants*;

8° de mesurer l'*isolement* des circuits;

9° de faire subir à la machine des épreuves de *surpuissance* et de *survitesse*.

L'***essai d'échauffement*** consiste à faire fonctionner la machine à sa puissance nominale et à son régime prévu le temps nécessaire pour qu'elle arrive à une température fixe. Cette température est mesurée soit avec des thermomètres, soit par l'accroissement de la résistance des enroulements. On en soustrait la température de l'air ambiant et l'on obtient l'échauffement de la machine.

Les limites admissibles de cet échauffement, différentes suivant les organes de la machine, sont mentionnées dans la notice C4 de l'U T E; elles sont, par exemple, de 50° pour le collecteur, 60° pour les inducteurs.

Cet essai est fort important : il renseigne sur la puissance possible de la machine.

L'épreuve de ***rigidité diélectrique*** est effectuée, soit après l'essai d'échauffement, soit à froid.

On applique une tension d'épreuve d'une part à l'enroulement essayé, d'autre part au bâti de la machine auquel sont reliés par des conducteurs les circuits magnétiques[1] et les enroulements non soumis à l'épreuve.

Cette tension doit être pratiquement sinusoïdale, de 25 à 60 périodes par seconde. Sa valeur atteint en général dans les essais à chaud 2U + 500 volts, U désignant la tension nominale de la machine. On l'applique pendant 60 secondes. Elle est de 2U + 750 volts pour les essais à froid et la durée d'application est de 5 secondes.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit ni perforation d'isolant, ni amorçage d'arc entre les différentes parties métalliques de la machine.

La ***mesure d'isolement*** est faite avec un ohmmètre à courant continu donnant au moins 500 volts. La durée d'électrisation est 1 minute. Pour les petites machines neuves de 600 watts au plus, l'isolement doit être au moins 40 mégohms.

L'***essai de survitesse*** consiste, en général, à faire tourner la machine essayée pendant 15 minutes à une vitesse qui atteint 1,20 ou 1,25 fois la vitesse nominale. Dans ***l'essai de surpuissance***, on demande à la machine pendant 5 minutes une puissance qui est 1,50 fois la puissance nominale.

Après ces épreuves, la machine ne doit présenter aucune défectuosité permanente susceptible de nuire à son bon fonctionnement.

Remarquez :

1° qu'un certain nombre de ces essais ont pour but de vérifier que la machine qui y est soumise possède les propriétés électriques qui correspondent à sa spécification;

1. Il est des cas où les diverses parties d'un circuit magnétique sont isolées électriquement les uns des autres; par exemple, dans les gros transformateurs les joints magnétiques entre les colonnes et les ponts sont munis d'une feuille mince de presspahn pour arrêter les courants de Foucault qui se produiraient à cause du chevauchement des tôles. Ce mode de construction pourrait rendre inaperçu un défaut d'isolement entre un enroulement et la colonne correspondante si tout le circuit magnétique n'était pas, pour l'essai relié à la carcasse.

2° que d'autres épreuves constatent la robustesse suffisante de la construction mécanique et électrique de l'appareil;

3° que les essais de rigidité diélectrique de survitesse et de surpuissance détériorent gravement la machine quand elle ne résiste pas à ces épreuves.

3. — Les constructeurs de matériel électrique réduisent le plus possible les essais en usine.

Quand un constructeur bien outillé fabrique en série un lot de machines du même type, ces machines sont pratiquement identiques. Il est inutile de les soumettre toutes à toutes les épreuves qui viennent d'être énumérées.

Des essais réduits, dits « *de contrôle* », sont constitués :

— par l'épreuve de rigidité diélectrique effectuée soit à chaud, soit à froid,

— par la mesure de l'isolement.

Les « *essais de type* » sont faits sur les machines importantes, sur celles que l'on construit par unité ou sur les premières machines d'une série mise en fabrication. Ils comprennent toutes les épreuves que nous avons indiquées.

4. — Pour en faire le sujet de manipulations, nous retiendrons seulement les essais instructifs.

Qu'il s'agisse de génératrices et de moteurs à courant continu ou de machines à courant alternatif, nous effectuerons seulement :

— les mesures de résistances,

— le relevé et le tracé des caractéristiques,

— la détermination du rendement.

Dynamo à excitation indépendante. Résistances et Caractéristique à vide.

1. — Examinons la plaque signalétique et la plaque de bornes de la machine à essayer.

La plaque signalétique réglementaire fournit les renseignements suivants qui nous guideront pour choisir les instruments de mesure et les autres appareils utilisés pour les essais de la machine :

Puissance nominale : 1 800 watts,
Tension : 115 volts,
Intensité : 15,7 ampères,
Vitesse : 2 000 tours par minute,
Excitation : en dérivation.

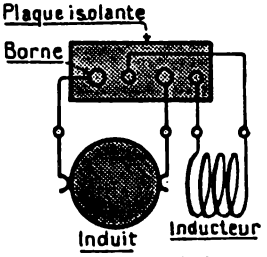


Fig. 1. — Plaque de bornes d'une dynamo.
Les connexions indiquées sont faites par le constructeur à l'intérieur de la machine.

Pour employer la machine avec excitation indépendante, il suffit de supprimer toute connexion entre l'induit et l'inducteur à la plaque de bornes et d'alimenter les deux circuits séparément.

La plaque de bornes (fig. 1) porte deux grosses bornes : celles de l'induit, et deux petites : celles de l'inducteur.

2. — Mesure des résistances de l'induit et de l'inducteur.

La méthode d'Ohm, avec ampèremètre et voltmètre, convient pour cette mesure.

Induit.

Choix des appareils. — L'induit supporte 16 ampères, il est peu résistant. Vous emploierez :

— un ampèremètre à cadre mobile et aimant avec un shunt de 20 ampères,

— un voltmètre à cadre mobile et aimant, calibre 15 volts,

— une source de courant continu pouvant fournir 15 ampères sous 15 volts avec un rhéostat de réglage de 2 ou 3 ohms, 15 ampères.

Montage. — Le schéma en est donné par la figure 2. Le branchement s'effectue à la plaque de bornes. La résistance mesurée comprend, outre celle de l'enroulement de l'induit, la résistance de contact des balais.

Mesures. — Effectuez trois ou quatre lectures en changeant de l'une à l'autre l'intensité du courant et la position de l'induit.

Les résultats seront consignés dans un tableau du modèle suivant :

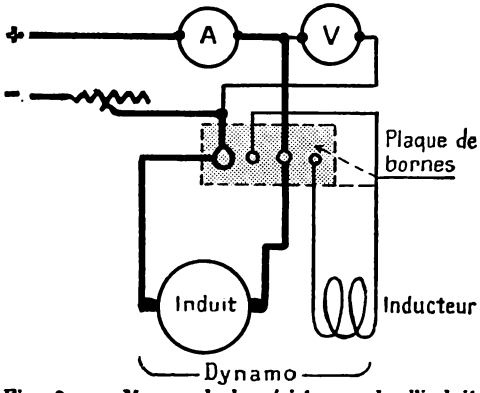


Fig. 2. — Mesure de la résistance de l'induit d'une dynamo.

DYNAMO N° ... — RÉSISTANCE DE L'INDUIT

LECTURES				CALCULS		
VOLTMÈTRE		AMPÈREMÈTRE		U	I	U : I
150 divisions	Calibre	100 divisions	Shunt			
1	2	3	4	5	6	7
107	15 V	66	20 A	10,7 V	13,2 A	0,81 Ω
116		72,5		11,6	14,5	0,80
133		81		13,3	16,2	0,82

Moyenne : 0,81 Ω

Inducteurs.

Choix des appareils. — L'inducteur admet normalement 115 volts à ses bornes, sa résistance est de l'ordre d'une centaine d'ohms.

Vous emploierez donc :

— un voltmètre 0-150 volts,

— un ampèremètre avec shunt de 2 ampères,

— une source de 130 volts avec un rhéostat de réglage d'une trentaine d'ohms pouvant supporter 2 ampères.

Montage. — C'est le montage habituel des mesures de résistances.

Lectures et calculs. — Vous utiliserez un tableau du modèle qui suit pour noter les résultats.

DYNAMO N°... — RÉSISTANCE DES INDUCTEURS

LECTURES				CALCULS		
VOLTMÈTRE		AMPÈREMÈTRE		U	I	U : I
150 divisions 1	Calibre 2	100 div. 3	Shunt 4	5		7
90,1	150 V	55	2 A	90,1 V	0,82 A	110 Ω
105,2		47,5		105,2 V	0,95	111
124		54		124	1,08	115

Moyenne : 112 ohms.

Remarques. — 1° L'erreur relative possible sur ces résultats est $\pm$ 0,02.

2° Les résistances sont mesurées à la température ambiante. Il serait préférable d'effectuer leur mesure à la température d'équilibre qu'atteint la machine après plusieurs heures de fonctionnement à pleine charge.

Caractéristique à vide.

Cette caractéristique est la courbe de la f. é. m. E de la génératrice en fonction du courant d'excitation *i* à vitesse N constante et courant débité nul. Cette f. é. m. est égale à la tension aux bornes de la dynamo.

3. — Relevé de la caractéristique à vide.

Choix des appareils. — La puissance absorbée par la dynamo à vide est faible; elle varie peu avec l'excitation. Un moteur asynchrone triphasé convient donc bien pour donner à la machine une vitesse constante. D'ailleurs la f. é. m. E est proportionnelle à la vitesse et il est facile de tenir compte de l'influence des faibles variations accidentelles de cette vitesse.

Un voltmètre 0-150 volts est branché aux bornes de l'induit.

L'intensité du courant dans l'inducteur doit pouvoir être réglée à une valeur très faible. Vous emploierez un potentiomètre capable de supporter 200 volts à ses bornes. Un ampèremètre avec un shunt de 2 ampères est placé en série avec l'inducteur.

Le montage des appareils est indiqué par la figure 3.

Mesures. — Vous les effectuerez rapidement pour que les sources de

courant employées n'aient pas le temps de se modifier pendant l'essai.

Les lectures correspondantes de la vitesse, de l'excitation, de la f. é. m. doivent être bien simultanées. Trois opérateurs sont nécessaires : l'un règle l'excitation, donne le « top » signal des lectures et mesure l'excitation, un autre mesure la vitesse de rotation, un troisième lit la tension aux bornes de la génératrice et note toutes les lectures faites.

Une première série de lectures est effectuée par valeurs croissantes de *i*, une seconde par valeurs décroissantes.

On obtient, par exemple, les valeurs suivantes :

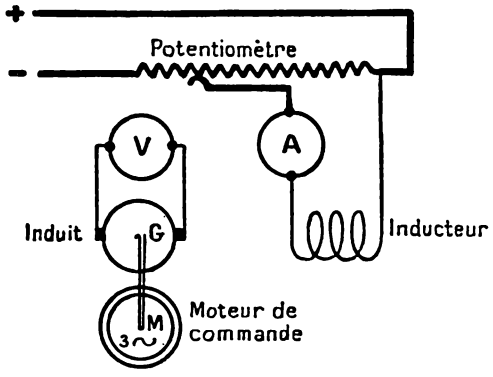


Fig. 3. — Montage pour déterminer la caractéristique à vide d'une dynamo à excitation indépendante.
Le double trait rectiligne MG indique que le moteur commande la génératrice.

DYNAMO N°... — CARACTÉRISTIQUE A VIDE

LECTURES					CALCULS	
AMPÈREMÈTRE 100 divisions		VOLTMÈTRE 150 divisions		Vitesse	*i*	E
Shunt	Lectures	Calibre	Lectures			à 2 000 t/mn
1	2	3	4	5	6	7
2 A	0	150 V	2,5	2 000 t/mn	0 A	2,5 V
	10		45	2 000	0,20	45
	20		89	2 000	0,40	89
	30		118	2 000	0,60	118
	40		140	2 000	0,80	140
	50		153	2 000	1,00	153
	60		165	2 000	1,20	165
	75		180	2 000	1,50	180
	70		176,5	2 000	1,40	176,5
	60		167,5	2 000	1,20	167,5
	35		135	2 000	0,70	135
	27,5		117,5	2 000	0,55	117,5
	10		53,7	2 000	0,20	53,7
	0		10	2 000	0	10

Tracé de la caractéristique. — Les valeurs de *i* seront portées en abscisses à l'échelle de 1 millimètre pour 0,01 ampère; en ordonnées, 1 millimètre représentera 1 volt (fig. 4).

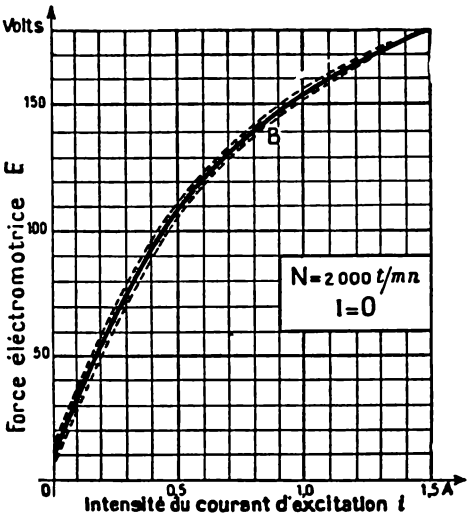


Fig. 4. — Caractéristique à vide d'une dynamo à excitation indépendante : c'est la courbe $E = f(i)$ à vitesse N constante et intensité débitée I nulle.

4. — On obtient aussi la caractéristique à vide en faisant fonctionner la dynamo en moteur.

Principe du procédé. — On établit un courant d'excitation *i* dans la machine; on applique aux bornes de l'induit une tension U que l'on règle pour que la vitesse N′ de l'induit s'approche le plus possible de la vitesse normale N de la dynamo. On mesure l'intensité I absorbée par l'induit.

En désignant par E′ la c. é. m. du moteur

$$U = E' + RI$$

d'où $$E' = U - RI$$

Cette f. c. é. m. est égale à la f. é. m. de la génératrice tournant à la même vitesse avec la même excitation.

Si la vitesse N′ du moteur diffère de la vitesse N choisie pour le tracé de la caractéristique, on corrige la f. é. m. trouvée avec la formule

$$E = E' \cdot \frac{N}{N'}$$

Cette méthode est moins bonne que la précédente parce que le réglage et la mesure de la vitesse d'un moteur sont peu précis.

Montage des appareils. — Des potentiomètres pour régler *i* et I sont plus commodes que des rhéostats en série.

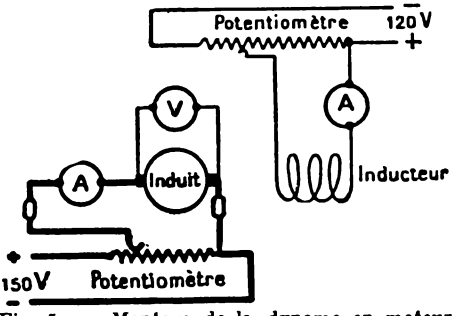


Fig. 5. — Montage de la dynamo en moteur à excitation indépendante pour déterminer la caractéristique à vide. On évite ainsi l'emploi d'un moteur pour entraîner la dynamo.

Le montage est indiqué par la figure 5. Vous remarquerez que des fusibles sont placés sur le circuit de l'induit pour éviter que le moteur ne s'emballe quand il est peu excité.

Trois opérateurs lisent simultanément au signal de l'un d'eux la vitesse N', les intensités *i* et I et la tension U.

Les résultats sont inscrits dans un tableau du modèle suivant :

DYNAMO N°... — CARACTÉRISTIQUE A VIDE

LECTURES							CALCULS				
Vitesse	Excitation AMPÈREMÈTRE		Tension VOLTMÈTRE		Intensité absorbée		I	U	RI	E' = U-RI	$E = E' \times \frac{N}{N}$
	Shunt	Lect.	Calibre	Lect.	Calibre	Lect.					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

5. — Examinons la courbe obtenue.

1° Elle présente deux branches; celle qui correspond aux valeurs décroissantes de l'excitation est plus élevée que celle qui est obtenue avec les valeurs croissantes.

La caractéristique à vide est en effet la courbe d'aimantation du circuit magnétique de la dynamo, *c'est une moitié de cycle d'hystérésis.*

En général, on ramène la courbe à une seule ligne en prenant la moyenne des ordonnées des deux branches.

2° Sa forme renseigne sur la constitution magnétique de la dynamo. Ainsi la figure 4 dans laquelle le coude de saturation est peu marqué indique que l'entrefer de la machine essayée est relativement grand.

3° Le point de fonctionnement normal de la dynamo est en B. Dans cette région, la pente de la caractéristique est importante : le fonctionnement de cette génératrice est peu stable.

Calage des balais des machines à courant continu.

Dans les machines de construction ancienne, la position des balais, au voisinage de la ligne neutre, varie avec la charge. Pour chaque charge, on règle les balais de manière à obtenir le minimum d'étincelles.

Dans les machines modernes, génératrices ou moteurs, les balais doivent se trouver, à toutes charges, exactement sur la ligne neutre. Décrivons les opérations à effectuer pour déterminer cette position dans le cas d'une machine bipolaire.

Montage. — L'induit est alimenté par une source de courant continu capable de fournir 3 ou 4 ampères, avec un interrupteur dans le circuit. Nous emploierons soit une batterie de 2 ou 3 accumulateurs, soit une source de 110 volts avec un rhéostat de réglage d'environ 30 ohms.

Aux bornes de l'inducteur, nous branchons un voltmètre à courant continu dont le calibre est de l'ordre d'une vingtaine de volts.

Opérations. — 1° L'examen des connexions de l'enroulement de l'induit aux lames du collecteur nous indique où se trouve approximativement la ligne neutre. Plaçons les balais nettement hors de la ligne neutre, par exemple à droite. Établissons le courant dans l'induit : une impulsion lance l'aiguille du voltmètre, par exemple vers la gauche, puis l'aiguille revient au zéro de l'échelle. Supprimons le courant dans l'induit : l'aiguille est lancée en sens contraire, vers la gauche.

2° Plaçons les balais à gauche de la ligne neutre. En établissant, puis en supprimant le courant dans l'induit, l'aiguille du voltmètre est lancée d'abord vers la gauche, puis vers la droite.

3° En déplaçant la ligne des balais entre les deux positions précédentes, nous trouvons, après quelques tâtonnements, une position pour laquelle l'aiguille du voltmètre ne bouge plus lors de l'établissement et de la rupture du courant dans l'induit. Les balais sont alors sur la ligne neutre, c'est leur position normale de calage.

Justification de ce procédé opératoire. — Les brefs courants dans le circuit inducteur et le voltmètre sont des courants induits par l'établissement ou la suppression d'un flux magnétique dans la carcasse de l'induit. Ces courants s'annulent quand ce flux est normal à l'axe des bobines inductrices. Les balais sont alors sur la ligne neutre.

Nous aurions pu placer le voltmètre aux bornes de l'induit, en établissant et coupant le courant dans l'inducteur, mais cette façon de procéder a l'inconvénient de produire dans l'inducteur des f. é. m. élevées, dangereuses pour l'isolement de ses enroulements.

Dans le cas d'une machine multipolaire, on détermine de la même façon la position de calage des balais.

Dynamo à excitation indépendante. Caractéristique en charge. Courbe de réaction d'induit.

1. — Pour charger une génératrice, on la fait débiter dans des résistances.

Ces résistances de charge sont soit des rhéostats de lampes, soit des rhéostats métalliques, soit des rhéostats à liquide.

Rhéostats de lampes. — Douze douilles à vis E 27 à embases de porcelaine sont montées sur un châssis en fer plat ou fer cornière. Chaque douille est commandée par un *interrupteur Tumbler*. Avec trois jeux de lampes à culot à vis de 100 watts — 120 volts, 200 watts — 120 volts, 200 watts — 240 volts, le rhéostat peut absorber soit 1 200, soit 2 400 watts.

On met en parallèle plusieurs rhéostats semblables s'il est nécessaire.

Rhéostats métalliques. — Les rhéostats à manette et plots ne conviennent pas : aux fortes charges une grande partie des résistances sont hors circuit et celles qui fonctionnent doivent être volumineuses pour ne pas chauffer exagérément; la matière est donc mal utilisée.

Il est préférable de disposer d'une douzaine d'éléments résistants identiques, capables chacun de supporter la tension de la génératrice et de les monter en dérivation en nombre variable suivant la charge.

Pour préciser, chaque élément est constitué par un fil RNC. 1, long de 20 mètres, de diamètre 0,70 millimètre, enroulé sur des plaques de fibro-ciment de 280 × 80 portant des encoches sur les champs à intervalles de 3 millimètres. Il faut deux plaques en série pour recevoir les 20 mètres de fil.

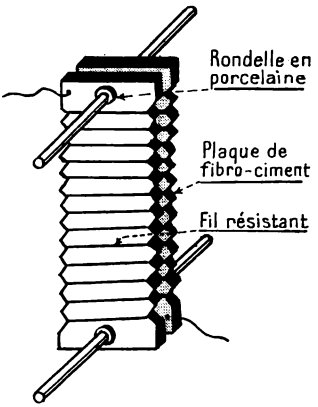


Fig. 1. — Plaque de fibro-ciment avec enroulement de fil résistant. — Le fil est enroulé sur chaque plaque, et les plaques sont connectées en série.

Les plaques résistantes sont enfilées sur deux tiges filetées avec des rondelles intercalaires en porcelaine.

Chaque élément absorbe 2 ampères sous 110 volts ou 4 ampères sous 220 volts sans atteindre une température excessive. Les interrupteurs sont ou des Tumbler ou des interrupteurs à couteaux sans rupture brusque.

Plusieurs rhéostats semblables sont montés en parallèle au besoin.

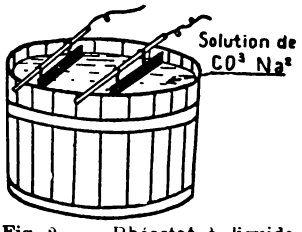


Fig. 2. — Rhéostat à liquide. — Deux plaques de tôle de fer plongent dans la solution de carbonate de sodium.

Rhéostats à liquide. — Dans un cuveau en bois contenant une solution de carbonate de sodium plongent deux électrodes en tôle de fer de 16 décimètres carrés. On règle l'intensité absorbée en faisant varier la distance des électrodes (fig. 2).

Ces rhéostats sont instables et malpropres.

2. — Choisissons les appareils pour le relevé de la caractéristique en charge.

Cette caractéristique est la courbe U = F (I) de la tension aux bornes de la dynamo en fonction de l'intensité débitée, l'excitation et la vitesse de la machine restant constantes.

Au cours de l'essai, quand la charge de la génératrice change, la vitesse du moteur qui commande la machine varie en sens contraire. Pour la ramener à sa valeur primitive, il faut que le moteur soit réglable. On utilise un moteur à courant continu, excité en dérivation, avec un rhéostat de champ.

Si à l'instant de la mesure de la tension aux bornes U', la vitesse N de la génératrice diffère un peu de la vitesse normale N, on corrige la lecture faite en prenant pour valeur de la tension aux bornes

$$U = U' \times \frac{N}{N'}.$$

Cette correction n'est qu'approximative. En effet, désignons par E' la f. é. m. à la vitesse N' et E la f. é. m. à la vitesse N, par r la résistance de l'induit et I le courant débité, on a, en négligeant la réaction magnétique de l'induit :

$$U' = E' - rI \qquad U = E - rI \qquad E = E' \times \frac{N}{N'}$$

d'où en éliminant E et E'

$$U = U' \times \frac{N}{N'} + rI \left(\frac{N}{N'} - 1\right)$$

mais le terme $rI \left(\frac{N}{N'} - 1\right)$ est négligeable si N et N' sont voisins.

Un ampèremètre avec shunt de 2 ampères sert à vérifier que l'excitation reste constante.

On mesure le débit avec un ampèremètre à shunt de 20 ampères et la tension aux bornes de la dynamo avec un voltmètre 0-150 volts.

La figure 3 est le schéma du montage des appareils.

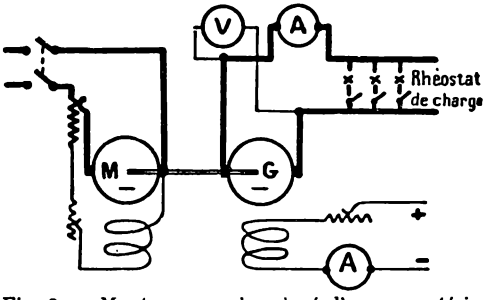


Fig. 3. — Montage pour le relevé d'une caractéristique en charge d'une dynamo à excitation indépendante U = F (I). — Vitesse constante; résistance du circuit d'excitation invariable.

3. — Marche de l'essai.

Lectures. — La tension à vide est réglée à une valeur qui dépasse de 5 à 10 % la tension nominale, soit, pour la machine essayée, à 125 volts.

Trois opérateurs *A*, *B*, *C* travaillent en même temps; ils font les lectures simultanément au signal « top » donné par le chef de groupe : *A* règle et mesure la vitesse N′ de la génératrice; *B* surveille l'excitation et mesure l'intensité débitée I; *C* manœuvre le rhéostat de charge, donne le signal des lectures, lit la tension aux bornes U′ et note les lectures faites sur un tableau du modèle suivant:

DYNAMO N°... — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE

LECTURES				CALCULS	
Vitesse N′	Excitation Amp. 100 div. shunt 2 A	Débit I Amp. 100 div. shunt 20 A	Tension U′ Volt. 150 div. calibre 150	Intensité I	Tension cor. $U' \times \frac{N}{N'}$
1	2	3	4	5	6
2 000/mn	31,5	0	125	0 A	125 V
2 000		10	122,5	2	122,5
1 930		25	115	5	119
2 000		40	115	8	115
2 050		50	113,5	10	112
2 020		65	107,6	13	107
2 000		80	101	16	101
2 000	31,5	90	97	18	97

Tracé de la courbe. — **Portez les intensités corrigées en abscisses à l'échelle de 6 millimètres pour 1 ampère et les tensions en ordonnées à l'échelle de 1 millimètre pour 1 volt (fig. 4).**

4. — Traçons la courbe de réaction totale d'induit.

C'est la courbe E-U = φ (I) de la différence entre la f. é. m. E et la tension aux bornes U en fonction de l'intensité débitée I, l'excitation et la vitesse restant constantes.

Du tableau du paragraphe précédent, nous tirons :

DYNAMO N°... — RÉACTION TOTALE D'INDUIT

I	0	2	5	8	10	13	16	18	Ampères
E–U	0	2,5	6	10	13	18	24	28	Volts.

La courbe est tracée dans le bas de la figure 4.

Cette baisse de tension aux bornes de la machine quand elle débite du courant est due à la chute ohmique dans l'induit et à la réaction magnétique de l'induit. Les effets des deux actions sont faciles à séparer : il suffit de tracer la droite $u = rI$ représentant la chute ohmique.

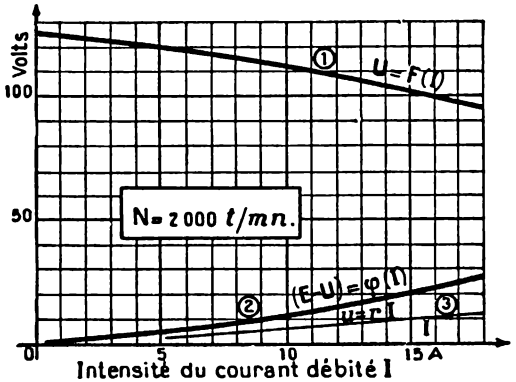


Fig. 4. — Dynamo à excitation indépendante.
1. — Caractéristique en charge ; U, tension aux bornes ; I, intensité du courant débité.
2. — Courbe de réaction totale d'induit, (E-U) = φ (I).
3. — Courbe de la chute ohmique dans l'induit, $u = r\ I$.

Pour la machine essayée, la réaction totale d'induit est relativement grande, l'induit est d'ailleurs fort résistant. Il serait préférable d'effectuer les essais avec des machines plus puissantes, de 4 kW au moins, dont les propriétés sont plus normales.

La courbe est à peu près indépendante de l'excitation.

5. — Conclusion.

De la caractéristique à circuit ouvert et de la caractéristique en charge d'une *dynamo fonctionnant à excitation indépendante*, on peut déduire les propriétés de la génératrice quel que soit son mode d'excitation; vous le ferez pour une machine shunt dans la manipulation suivante; aussi détermine-t-on ces deux courbes fondamentales pour toutes les dynamos à essayer.

Dynamo excitée en dérivation. Caractéristique en charge. Courbe de réglage.

1. — Les essais d'une dynamo shunt comportent au préalable la mesure des résistances et la détermination de la caractéristique à vide de la machine.

Nous essayerons, *en l'excitant en dérivation*, la génératrice qui a servi dans les deux manipulations précédentes. Nous en connaissons les résistances, ainsi que les caractéristiques à vide et en charge et la courbe de réaction d'induit quand elle fonctionne avec *excitation indépendante*.

Il est possible de relever la caractéristique à vide à vitesse constante en excitant la dynamo en dérivation. Un rhéostat de champ est placé dans le circuit des inducteurs branché aux bornes de l'induit. La machine est entraînée à sa vitesse normale que l'on maintient constante. On fait *décroître* le courant d'excitation depuis sa plus grande valeur, quand le rhéostat de champ est hors circuit, jusqu'à désamorcement de la dynamo et on note les valeurs de la tension aux bornes de l'induit correspondant aux diverses valeurs de l'excitation. Cet essai ne donne que la partie élevée d'une courbe qui se confond pratiquement avec la caractéristique à vide à excitation indépendante dans la même région.

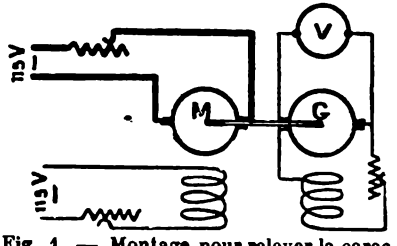


Fig. 1. — Montage pour relever la caractéristique à vide d'une génératrice shunt à auto-excitation.
La génératrice est commandée par un moteur à c. c. avec excitation indépendante pour obtenir une gamme très étendue de vitesses.

2. — La caractéristique à vide, à vitesse variable, en auto-excitation, la résistance du circuit inducteur restant constante, traduit les propriétés d'une génératrice shunt à vide.

C'est *la courbe de la f. é. m. en fonction de la vitesse*, E = F (N), *le circuit inducteur étant connecté aux bornes de l'induit et sa résistance restant invariable.*

La machine est entraînée par un moteur à courant continu à vitesse réglable, à excitation indépendante (fig. 1). On mesure les vitesses en tours par minute de la machine avec un tachymètre, et, avec un voltmètre, les f. é. m. correspondantes.

Pour la machine essayée, les lectures faites ont été les suivantes :

DYNAMO SHUNT N°....
CARACTÉRISTIQUE A VIDE A VITESSE VARIABLE

LECTURES			RÉSULTATS	
TACHYMÈTRE	VOLTMÈTRE 150 divisions		Vitesse N	E = F (N)
	Calibre	Nombre lu		
1	2	3	4	5
535 t/mn	7,5 V	67	535 t/mn	3,35 V
635	»	113	635	5,65
715	30 V	70	715	14
1 100	150 V	66	1 100	66
1 190	»	81,5	1 190	81,5
1 290	»	94	1 290	94
1 430	»	112	1 430	112
1 590	»	131	1 590	131
1 800	»	160	1 800	160
1 850	»	165	1 850	165

La figure 2 représente la courbe E = F (N). Elle donne lieu aux remarques suivantes[1] :

1° quand la dynamo démarre et tourne à faible vitesse dans le sens convenant à l'auto-excitation, la f. é. m. croît très lentement; elle est proportionnelle à la vitesse tant que la machine n'est pas amorcée;

2° quand la vitesse atteint la valeur N_o, dite *vitesse critique* d'amorçage (ici $N_o \simeq 630$ t/mn), la f. é. m. s'accroît très rapidement pour une faible augmentation de la vitesse : la machine est *auto-excitée;*

3° enfin, lorsque la vitesse est grande, la f. é. m. s'accroît moins vite

1. Rappelons la double condition d'amorçage d'une génératrice shunt :
1° le *sens de rotation* de l'induit doit être tel que le courant produit dans les inducteurs en renforce le magnétisme rémanent; s'il y a lieu, on réalise cette condition en renversant le sens de rotation, ou en permutant les connexions des inducteurs à l'induit.
2° la *résistance totale du circuit inducteur* doit être inférieure à une valeur dite critique qui croît d'ailleurs avec la vitesse de rotation de l'induit.

parce que le courant d'excitation a atteint des valeurs pour lesquelles le circuit magnétique de la machine est saturé, la f. é. m. redevient alors proportionnelle à la vitesse de rotation.

3. — Relevons la caractéristique en charge de la machine excitée en dérivation.

C'est *la courbe de la tension aux bornes, en fonction du courant débité*, U = *f* (I), *à vitesse constante et résistance du circuit d'excitation invariable.*

Choix des appareils. — La dynamo est entraînée par un moteur shunt à courant continu avec un rhéostat de champ pour réglage de la vitesse (fig. 3).

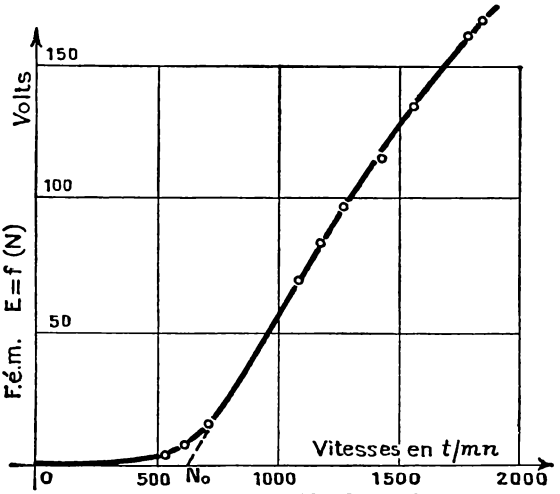


Fig. 2. — Caractéristique à vide d'une dynamo shunt, à vitesse variable, à auto-excitation, la résistance du circuit inducteur restant constante.

Un rhéostat de champ est en série avec les inducteurs connectés aux bornes de l'induit. La tension est réglée à vide à 5 ou 10 % au-dessus de la tension normale. Ce réglage effectué, on ne touche plus au rhéostat.

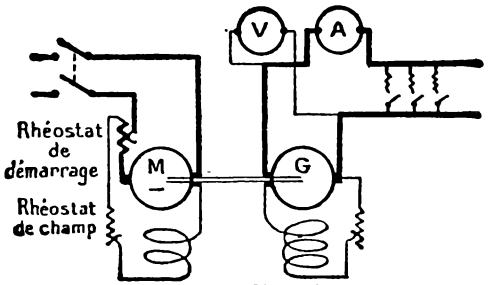


Fig. 3. — Montage pour déterminer la caractéristique en charge d'une génératrice shunt. La résistance totale du circuit inducteur (inducteur et rhéostat) reste invariable.

La machine débite dans un rhéostat de charge de préférence métallique. Un ampèremètre avec shunt de 20 ampères est en série avec l'induit.

Un voltmètre à double portée de mesures, 150 et 300 volts, est placé aux bornes de l'induit.

Mesures. — Il est bon de faire fonctionner la dynamo à vide pendant une heure avant de commencer les lectures pour que la

température de l'inducteur se stabilise et que la résistance de l'enroulement inducteur ne change pas au cours de l'essai.

Trois observateurs opèrent ensemble :
A fait varier le débit et lit les indications de l'ampèremètre;
B règle et mesure la vitesse;
C donne le signal des lectures, note la tension aux bornes de l'induit et inscrit les lectures dans le tableau suivant :

DYNAMO SHUNT N°... — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE

LECTURES				CALCULS	
Vitesse	Ampèremètre 100 div. shunt 20 A	Voltmètre 150 divisions Calibre	Voltmètre 150 divisions Lectures	I	U
1	2	3	4	5	6
2 000 *t/mn*	0	300 V	82,5	0 A	165 V
	10		81	2	162
	25		78	5	156
	40		74,5	8	149
	50	150	143	10	143
	65		133	13	133
	80		124	16	124
	90		114	18	114

Pour une résistance plus faible du rhéostat de charge, la baisse de la tension s'accélère et la machine se désamorce.

Tracé de la courbe. — L'échelle des abscisses sera de 1 centimètre par ampère et celle des ordonnées de 1 millimètre par volt.
La courbe obtenue est représentée à une échelle réduite par la figure 4.
La chute de tension y est rapide, elle serait plus lente dans le cas d'une génératrice plus puissante.

Remarque. — En donnant au circuit inducteur d'autres résistances on peut tracer d'autres caractéristiques en charge (fig. 8).

4. — Déterminons la courbe de réglage.

C'est la courbe de l'intensité débitée en fonction de l'intensité d'excitation, $I = f(i)$, quand la tension aux bornes est maintenue constante et la vitesse invariable.

Pour l'obtenir, intercalons un ampèremètre avec un shunt de 1 ampère

dans le circuit d'excitation et un rhéostat de champ de 70 ohms à grand nombre de plots (fig. 5).

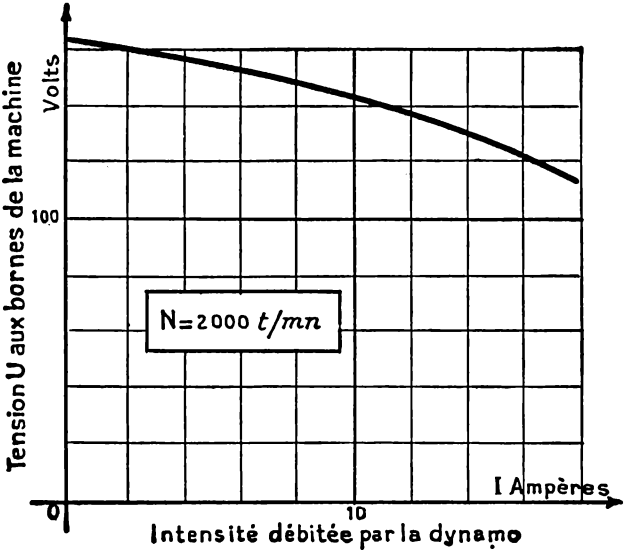


Fig. 4. — Caractéristique en charge d'une dynamo excitée en dérivation.

Maintenons la vitesse à 2 000 tours par minute, la tension aux bornes à 115 volts et mesurons l'intensité d'excitation pour des débits croissants.

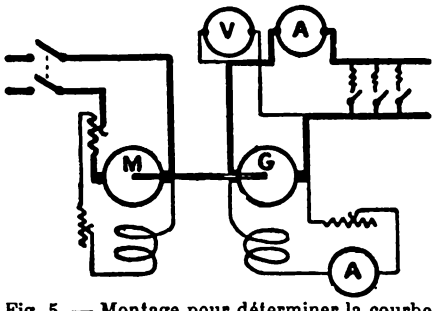


Fig. 5. — Montage pour déterminer la courbe de réglage d'une dynamo shunt.

Quatre opérateurs sont nécessaires :

A fait varier le débit et le mesure;

B règle et mesure la vitesse;

C règle et mesure l'excitation en maintenant la tension aux bornes de la dynamo à 115 volts;

D donne le signal des lectures et inscrit les résultats dans un tableau tel que le suivant ;

DYNAMO SHUNT N° ... — COURBE DE RÉGLAGE

LECTURES				RÉSULTATS	
Vitesse	*Tension* Volt. 150 div. Cal. : 150 V	*Débit* Amp. 100 div. Shunt : 20 A	*Excitation* Amp. 100 div. Shunt : 1 A	*Excitation*	*Débit* I
1	2	3	4	5	6
2 000 *tmn*	115	0	56	0,56 A	0 A
		10	57	0,57	2
		25	59	0,59	5
		40	63	0,63	8
		50	66	0,66	10
		65	72,5	0,725	13
		80	79	0,79	16
		90	83	0,83	18

La courbe de réglage est tracée en portant la valeur de l'excitation en abscisses à raison de 2,5 millimètres pour 0,01 ampère et les débits en ordonnées à raison de 5 millimètres par ampère. Elle est représentée à une échelle réduite par la figure 6.

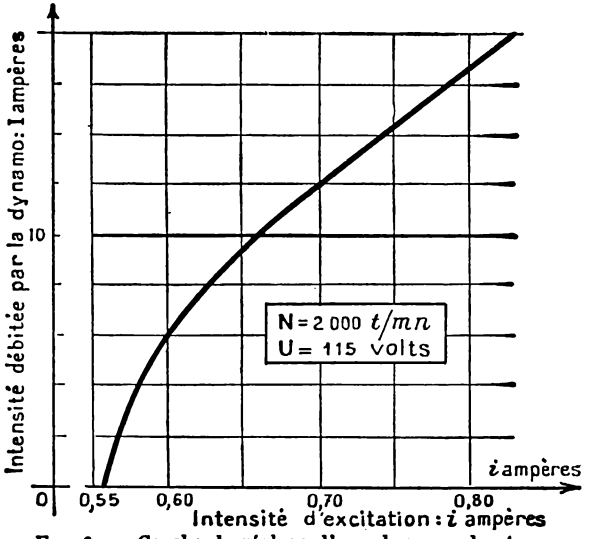


FIG. 6. — Courbe de réglage d'une dynamo shunt. Vitesse constante. Tension aux bornes constante. La courbe donne les valeurs de l'intensité débitée en fonction du courant d'excitation.

Elle sert à déterminer le rhéostat de réglage. Pour que l'excitation varie de 0,56 à 0,83 ampère sous 115 volts, la résistance totale du circuit inducteur doit passer de 206 à 119 ohms. La résistance de l'enroulement froid est 112 ohms, le rhéostat de champ aura donc au moins 94 ohms. Il est possible de déterminer comment il doit être

fractionné pour que chaque plot règle la tension à 115 volts, à chaud, pour chaque variation du débit de 1 ampère.

5. — La caractéristique en charge de la dynamo en dérivation se construit aussi à partir de la caractéristique à vide et de la courbe de réaction totale d'induit de la machine à excitation indépendante.

La figure 7 réunit à droite de l'axe des coordonnées la caractéristique à vide de la dynamo et à gauche la courbe de réaction d'induit pour la v tesse normale de 2 000 tours par minute; les ordonnées en sont tracées à a même échelle. Nous nous proposons de trouver un point de la carac-

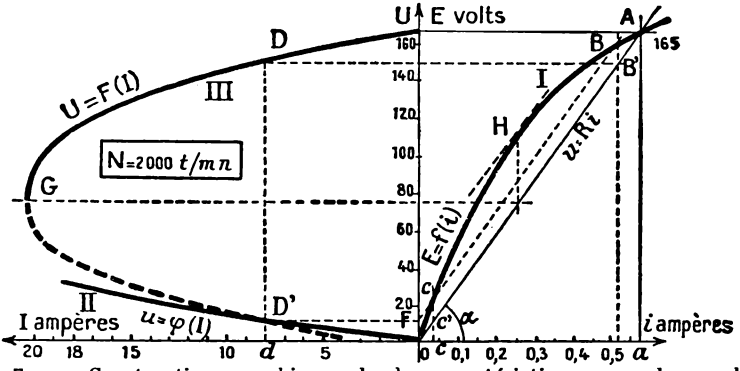


Fig. 7. — Construction graphique de la caractéristique en charge d'une dynamo excitée en dérivation.

On connaît { la caractéristique à vide, E = f (*i*), courbe I; la courbe de réaction totale d'induit, $u' = \varphi$ (I), courbe II; la résistance totale R du circuit inducteur et par suite la droite $u = Ri$.

On en déduit la caractéristique en charge, U = F (I), courbe III.

Erratum : dans la figure la courbe II doit porter l'indication $u' = \varphi$ (I).

téristique en charge de la machine excitée en dérivation correspondant à un débit O*d* quand la f. é. m. à vide de la dynamo atteint 165 volts.

Soit A le *point de fonctionnement à vide* tel que *a*A égale 165 volts. O*a* mesure l'excitation *i* qui détermine cette f. é. m. E. Cette intensité se produit quand le circuit inducteur de résistance totale R est branché directement aux bornes de l'induit, donc $E = Ri$. La droite OA représente, par conséquent, la fonction $u = Ri$, c'est-à-dire *la tension aux bornes de l'inducteur* en fonction du courant inducteur et aussi la force électromotrice de la dynamo si l'on néglige la faible chute de tension *ri* dans

l'induit. Remarquez que $tg\ \alpha = \frac{aA}{Oa} = \frac{E}{i} = R$, du moins au coefficient près qui résulte du choix des échelles[1].

Quand la dynamo débite I ampères, la tension à ses bornes baisse à cause de la réaction d'induit. Il en est de même du courant inducteur. Supposons que l'excitation qui correspond au débit I = O*d* et à la réaction d'induit *d*D' soit O*b*. *b*B' représente la tension aux bornes de la génératrice, *b*B la f. é. m. produite, donc B'B égale la chute de tension de réaction d'induit *d*D'.

D'où la construction : par le point D' de la courbe de réaction d'induit d'abscisse O*d* = I, nous menons D'F parallèle à l'axe des abscisses et par F la parallèle FCB à la droite de fonctionnement OA. Nous abaissons la

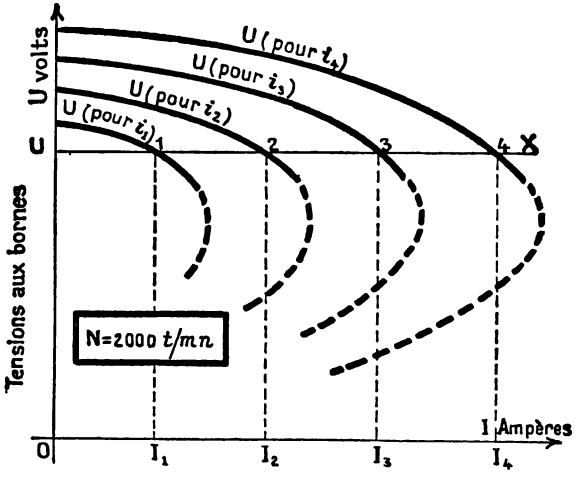


Fig. 8. — Faisceau de caractéristiques en charge donnant quatre couples de valeurs, i_1 I_1, i_2 I_2, i_3 I_3, i_4 I_4, pour la courbe de réglage à la tension U.

perpendiculaire B*b* à l'axe des abscisses, c'est la f. é. m. de la machine quand elle débite I ampères et *b*B' est la tension aux bornes.

Le point D ayant pour abscisse I = O*d* et pour ordonnée *b*B' est un point de la caractéristique en charge de la machine shunt.

Remarquons que la droite FCB coupe la caractéristique à vide en deux points C et B, par conséquent à chaque valeur de I correspondent, en

1. Si les échelles sont 0,5 mm pour 1 volt et 50 mm pour 1 ampère, on $aA = 0{,}5\ E$ et $Oa = 50i$, donc $tgx = \frac{aA}{Oa} = 0{,}5\ E : 50i = \frac{E}{100i} = \frac{R}{100}$.

général, deux ordonnées *c*C′ et *b*B′. La caractéristique en charge a donc la forme indiquée dans la figure 5. Le point extrême G est fourni par la tangente en H parallèle à 0A à la caractéristique à vide. La branche inférieure G0 s'obtient expérimentalement avec difficulté. Dans cette région, la tension aux bornes et le débit baissent en même temps, la dynamo tend à se désamorcer.

6. — Avec un faisceau de caractéristiques en charge, il est possible de tracer une courbe de réglage.

A *une* valeur déterminée de la résistance totale R du circuit inducteur correspond *une* caractéristique en charge. On peut tracer un faisceau de ces caractéristiques pour des valeurs i_1, i_2, i_3, i_4, ... du courant d'excitation à vide (fig. 8).

On mène la droite X parallèle à l'axe des abscisses telle que l'ordonnée 0U représente la tension nominale aux bornes de la machine. Cette droite coupe les caractéristiques aux points 1, 2, 3, 4,..., qui correspondent aux débits I_1, I_2, I_3, I_4,... On obtient ainsi des couples de valeurs i_1, I_1 — i_2,I_2 — i_3,I_3 — i_4,I_4... avec lesquels on peut tracer la courbe de réglage pour la tension U.

Rendement d'une dynamo excitée en dérivation.

1. — Rappelons le principe de la méthode des pertes séparées[1].

En désignant par P_u la puissance utile de la dynamo et par p la puissance perdue, le rendement est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}$$

Pour calculer le rendement, on se donne **à priori la puissance utile**; c'est la puissance nominale de la machine ou une fraction fixée de cette puissance; il faut déterminer p.

Les pertes p comprennent :

1° des *pertes variables* avec la charge : c'est la puissance dissipée en chaleur Joule dans les enroulements de l'induit et de l'inducteur, calculable par la formule de Joule après mesure des résistances des circuits et des courants qui les traversent;

2° des *pertes constantes* quelle que soit P_u, ou admises comme telles : ce sont les *pertes mécaniques* par frottement dans les paliers, sous les balais, par ventilation, et les *pertes magnétiques* résultant de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les organes de la machine parcourus par un flux variable : carcasse et dents de l'induit, épanouissements et cornes polaires.

Les pertes par frottement dans les paliers et sous les balais sont fonction de la vitesse, elles croissent un peu avec la charge.

La puissance employée à la ventilation est proportionnelle au carré de la vitesse et indépendante de la charge.

Donc, admettre que les pertes mécaniques sont constantes à une vitesse déterminée, quelle que soit la charge, est une approximation qui ne comporte qu'une faible erreur.

Une formule dite de Steinmetz indique que la puissance perdue dans une masse magnétique soumise à une induction alternative qui varie de + B à — B et de — B à + R est proportionnelle à $B^{1,6}$. Cette formule

1. *Électricité industrielle. Machines électriques :* 17e leçon.

a été établie empiriquement pour des inductions inférieures à 6 000 gauss. Dans le cas des inductions élevées utilisées dans les machines actuelles, l'exposant 1,6 est trop faible. D'autre part, la puissance perdue par hystérésis est proportionnelle au nombre de cycles d'hystérésis par seconde, c'est-à-dire à la vitesse de l'induit.

Quant aux pertes résultant des courants de Foucault, elles sont proportionnelles au carré de l'induction et au carré de la vitesse.

Donc, les pertes magnétiques sont constantes si la vitesse et l'induction sont invariables. Or, quand la charge d'une génératrice ou d'un moteur croît, l'induction varie dans l'induit et dans les pièces polaires à cause de la distorsion du flux. Admettre que les pertes magnétiques sont indépendantes de la charge n'est donc pas tout à fait en accord avec les faits.

2. — Évaluation des pertes variables.

L'intensité I fournie par la machine a pour valeur $I = P_u : U$; elle est donc connue.

L'intensité i du courant d'excitation est mesurée sur la machine en fonctionnement ou relevée sur la courbe de réglage, $i = f(I)$.

a) ***Dans l'inducteur***, la puissance consommée est

$$p_d = Ui.$$

Remarquez que cette valeur comprend la perte en chaleur Joule dans la partie du rhéostat de champ qui est en série avec l'inducteur.

b) ***Dans l'induit***, le courant est $I_1 = I + i$. Si la résistance r de l'induit a été mesurée à froid, il faut majorer le nombre trouvé pour tenir compte de l'échauffement en marche normale. L'accroissement de température atteint en général 60°; or

$$r_{60} = r\,(1 + 0{,}004 \times 60) \simeq 1{,}25\,r$$

Donc $$p_i = 1{,}25\,r\,(I + i)^2$$

Pour la dynamo étudiée, à pleine charge U = 115 volts, I = 16 ampères. La courbe de réglage tracée dans la manipulation précédente donne la valeur $i = 0{,}79$ ampère. La résistance de l'induit à froid est 0,81 ohm.

Les pertes dans l'inducteur sont :

$$p_d = 115 \times 0{,}79 = 91 \text{ watts}$$

et celles dans l'induit :

$$p_i = 1{,}25 \times 0{,}81 \times (16 + 0{,}79)^2 = 285 \text{ watts.}$$

3. — Mesure des pertes constantes.

On les détermine globalement. On fait fonctionner la machine en moteur à vide à excitation séparée, à sa vitesse de régime, dans des conditions telles que la f. c. é. m. E soit égale à la f. é. m. dans le fonctionnement en génératrice. Dans ces conditions, on peut admettre que l'induc-

tion dans le circuit magnétique est la même qu'en charge. La puissance absorbée, déduction faite des pertes en chaleur Joule dans l'enroulement induit, représente les pertes mécaniques et magnétiques. On l'évalue en mesurant l'intensité absorbée par l'induit.

On dit qu'on fait ainsi « *le point à vide* » de la dynamo.

La machine est montée comme l'indique la figure 1 avec un rhéostat de champ dans le circuit d'excitation, un rhéostat de démarrage et un ampèremètre en série avec l'induit, un voltmètre aux bornes de l'induit.

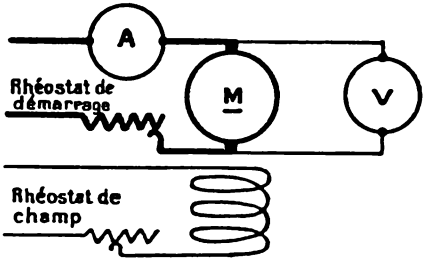


Fig. 1. — Pour déterminer les pertes mécaniques et magnétiques dans une dynamo, on la fait fonctionner en moteur à vide, à excitation séparée.

Il est nécessaire de connaître la f. é. m. E de la génératrice quand elle fournit la puissance $P_u = UI$; c'est la somme de la tension aux bornes U et de la réaction totale d'induit correspondant au débit $I + i$; la valeur de cette réaction est obtenue avec la courbe qui en a été tracée antérieurement.

On applique aux bornes du moteur à vide une tension U' supérieure à E de la chute ohmique que l'on présume devoir se produire dans l'induit du moteur, *soit* 1 *ou* 2 *volts;* on règle l'excitation pour obtenir la vitesse désirée, on note l'intensité absorbée I_0. La relation connue $U' = E' + rI_0$ donne la valeur E' de la f. c. é. m. réalisée. Si E' diffère trop de E, on modifie la tension U' et l'on recommence la mesure de I_0.

La puissance absorbée par le moteur est $U'I_0$; en déduisant la perte en chaleur Joule dans l'induit, rI_0^2, on obtient les pertes constantes :

$$p_c = U'I_0 - r\,I_0^2$$
$$= (U' - r\,I_0)\,I_0 = EI_0$$

Dans le cas de la machine étudiée, la courbe de réaction d'induit indique une chute de tension de 26 volts quand l'induit débite 16 ampères. La f. é. m. atteint donc 115 + 26 = 141 volts.

Avec 143 volts aux bornes, à la vitesse de 2 000 tours par minute, l'induit absorbe 1,5 ampère. Les pertes constantes s'élèvent donc à 141 × 1,5 = 212 watts.

L'intensité absorbée par le moteur à vide change peu quand la tension appliquée aux bornes varie de quelques volts; aussi, sans recourir aux caractéristiques, on admet souvent pour simplifier, pour la tension à

appliquer aux bornes du moteur à vide, la valeur approchée par défaut

$$U' = U + r\,(I + i).$$

4. — Calcul et courbe du rendement.

Puisque le total p des pertes est : $p = p_i + p_d + p_c$

la valeur du rendement est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p_i + p_d + p_c}$$

Pour la machine étudiée $P_u = 1\,800$ watts, donc

$$\eta = \frac{1\,800}{1\,800 + 91 + 285 + 212} = \frac{1\,800}{2\,368} = 0{,}75.$$

Remarques. — 1° Supposons qu'une erreur de 10 % soit commise dans l'évaluation des pertes constantes et qu'elles soient comptées pour 234 watts au lieu de 212. La valeur du rendement devient $\eta' = 0{,}746$.

Elle est peu modifiée. L'influence d'une erreur dans la mesure des pertes constantes serait moins grande encore dans le cas d'une machine puissante à rendement élevé. Il n'est donc pas indispensable de chercher une grande précision dans l'évaluation de ces pertes.

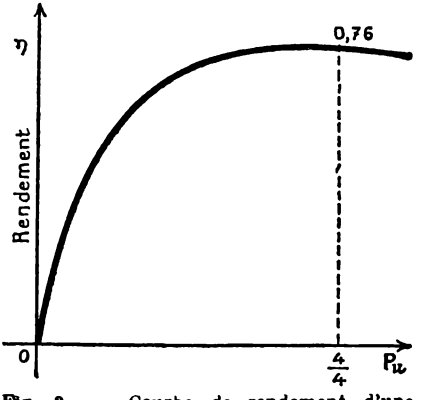


Fig. 2. — Courbe de rendement d'une dynamo en fonction de la charge.

2° Puisque les pertes magnétiques et mécaniques croissent un peu avec la charge et qu'on les mesure à vide, elles sont en réalité un peu plus grandes qu'on ne les a trouvées. Le rendement obtenu par la méthode des pertes séparées est donc un peu trop grand. En mesurant le rendement par d'autres méthodes qu'il n'y a pas lieu d'étudier ici, on le trouve inférieur de 1 à 2 pour cent.

Il faut donc considérer la méthode des pertes séparées comme une méthode conventionnelle, commode à appliquer, et qui donne le rendement avec une précision très suffisante dans la plupart des cas.

Vous calculerez le rendement pour les fractions suivantes de la charge nominale : $\frac{1}{4}, \frac{2}{4}, \frac{3}{4}, \frac{4}{4}$ et $\frac{5}{4}$ et vous construirez la courbe de ses valeurs en fonction de la charge utile. Cette courbe a la forme indiquée par la figure 2.

Dynamo excitée en série. Caractéristique en charge. Rendement.

L'essai s'effectue comme celui d'une machine shunt [1]. Nous indiquons seulement, à titre d'exemple, les résultats obtenus avec une dynamo de 3 kilowatts.

1. — Examinons la plaque signalétique et la plaque de bornes.

La plaque signalétique porte les indications suivantes :

Tension : 220 volts
Intensité : 13,6 ampères
Vitesse : 1 450 tours par minute.

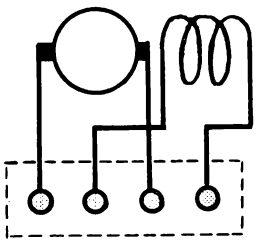


Fig. 1. — Plaque de bornes d'une machine série.

Sur la plaque de bornes, quatre bornes identiques sont disposées sur une seule ligne (fig. 1); il est facile, en suivant les connexions, de repérer les bornes de l'induit et celles de l'inducteur.

Notons que la machine est de construction ancienne, à carcasse en fonte, destinée à être employée en moteur plutôt qu'en génératrice.

2. — Mesurons les résistances de l'induit et de l'inducteur.

En opérant à la température ambiante, les mesures ont été les suivantes :

1. Les génératrices excitées en série ne s'emploient guère que comme « survolteurs ». L'étude de leurs propriétés n'a donc que peu d'importance pratique.

DYNAMO SÉRIE N°...
RÉSISTANCES DE L'INDUIT ET DE L'INDUCTEUR

	LECTURES		CALCULS		
	Ampèremètre. 100 divisions shunt : 10 A	Voltmètre 150 divisions calibre : 7,5V	I	U	$R = \frac{U}{I}$
	1	2	3	4	5
INDUIT	60,5	75,5	6,05 A	3,77 V	0,623 Ω
	80	99	8,0	4,95	0,618
	96	118	9,6	5,90	0,614
	Moyenne : 0,62 Ω				
INDUCTEUR	59,5	106,5	5,95 A	5,32 V	0,86 Ω
	78	131,5	7,8	6,57	0,84
	85	144,4	8,5	7,22	0,85
	Moyenne : 0,85 Ω				

3. — Relevons et traçons la caractéristique à vide de la machine à excitation séparée.

La dynamo est commandée par un moteur asynchrone triphasé. Elle tourne à 1 450 tours par minute. Les résultats trouvés sont les suivants :

DYNAMO SÉRIE N°... — CARACTÉRISTIQUE A VIDE A EXCITATION SÉPARÉE

LECTURES					CALCULS	
Ampèremètre 100 divisions Shunt	Lectures	Voltmètre 150 divisions Calibre	Lectures	Vitesse	I	E à 1450 t/mn
1	2	3	4	5	6	7
20 A	0	75 V	9,4	1 450 t/mn	0 A	4,7 V
	10	150	64,6		2,0	64,6
	20		108		4,0	108
	30		141,5	1 500	6,0	137
	43	300	82	1 450	8,6	164
	51		88		10,2	176
	60		99	1 525	12,0	188
	79		103,5	1 450	15,8	207
	69,5		96,5	1 400	14,0	200
	59,5		95,5	1 450	12,0	191
	50		90		10,0	180
	39		83		7,8	166
	30	150	144	1 500	6,0	149
	20		121	1 450	4,0	121
	10		82		2,0	82
	0	75	46		0	23

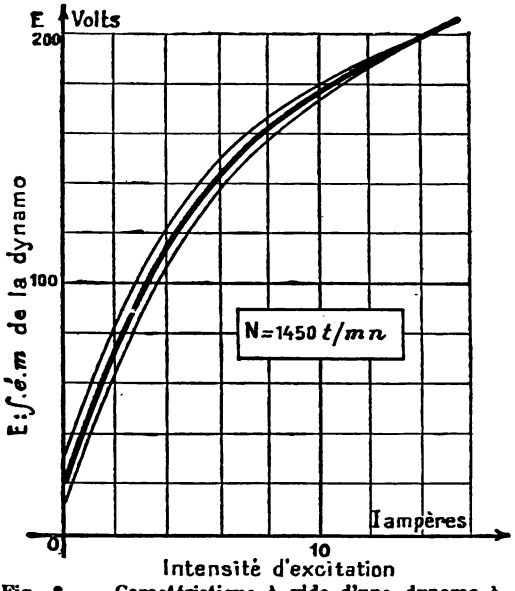


Fig. 2. — Caractéristique à vide d'une dynamo à carcasse de fonte.

La courbe est tracée à l'échelle de 1 centimètre par ampère en abscisses et 1 millimètre par volt en ordonnées. La figure 2 la représente à une échelle réduite avec la moyenne des deux branches.

4. — La machine fonctionnant à excitation séparée, déterminons la caractéristique en charge et la courbe de réaction d'induit.

Il est préférable d'employer une résistance de charge métallique.

Les résultats obtenus sont les suivants pour la caractéristique en charge.

DYNAMO SÉRIE N°... — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE A EXCITATION SÉPARÉE.

LECTURES				RÉSULTATS	
Vitesse	Excitation Ampèremètre : 100 div. shunt : 20 A	Débit Ampèremètre : 100 div. shunt : 20 A	Tension Voltmètre : 150 div. Calibre:300 V	I	U
1 450 t /mn	66	0	103,5	0 A	207 V
		10	103	2	206
		20	102,5	4	205
1 500		30	105	6	203
1 450		40	100,5	8	201
		50	98,5	10	197
		60	96,5	12	193
		70	103	14	189
1 450		80	91,5	16	183
1 450	66	85	88,5	17	178

Ce qui donne pour la réaction d'induit

1	2	4	6	8	10	12	14	16	17
E-U	1	2	4	6	10	14	18	24	29

La figure 3 représente les deux courbes.

5. — La machine étant excitée en série, déterminons la caractéristique en charge.

L'inducteur est branché dans le sens convenable pour que la machine s'amorce quand on place entre ses bornes une résistance de 15 à 20 ohms.

Elle débite dans une résistance métallique variable. L'intensité fournie et la tension aux bornes correspondante ont été mesurées. Les résultats sont les suivants :

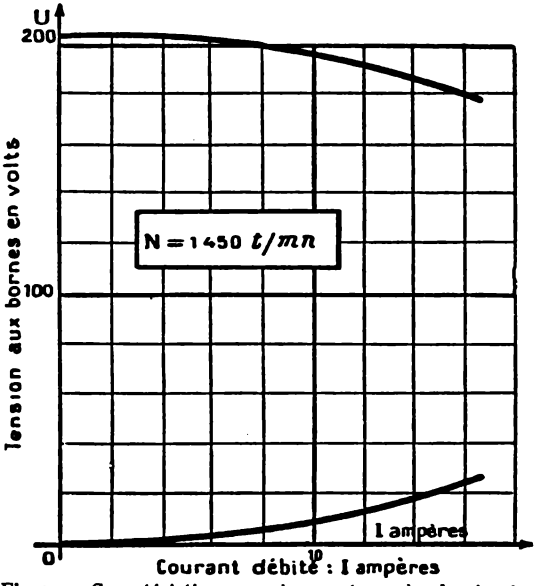


Fig. 3. — Caractéristique en charge et courbe de réaction d'induit de la machine fonctionnant avec l'excitation séparée.

I	2	4	6	8	10	12	14	16	17
U	68	109	134	147	161	167,5	173	174	172

La figure 4 représente la caractéristique. On voit que la tension croît avec le débit jusqu'au maximum de 174 volts pour 16 ampères. Le fonctionnement est stable de 14 à 17 ampères, puis la tension baisse rapidement quand le débit augmente.

Remarquez que la machine ne fournit pas la tension de 220 volts indiquée sur la plaque signalétique. Cette plaque concerne le fonctionne-

ment de la machine en moteur. Pour obtenir 220 volts aux bornes avec un débit de 13,6 ampères, il faudrait faire tourner la génératrice à 1 800 tours par minute.

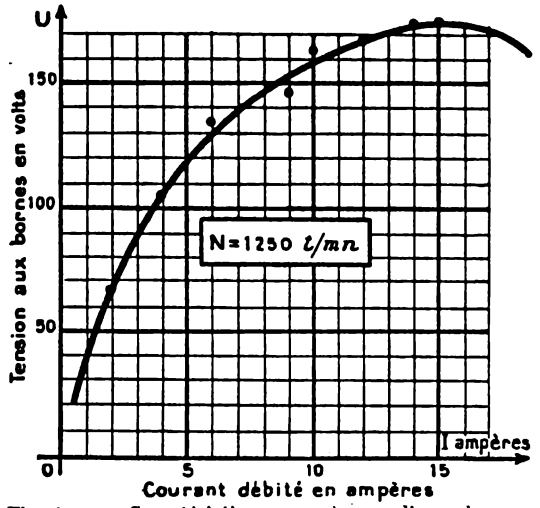


Fig. 4. — Caractéristique en charge d'une dynamo excitée en série.
(Erratum : lire N = 1450 et non 1250.)

6. — La caractéristique en charge s'obtient aussi graphiquement.

La figure 5 rassemble la caractéristique à vide I et la courbe de réaction d'induit II fournie par l'essai de la machine en charge, à excitation séparée. La droite III, qui y est ajoutée, représente, comptée au-dessous de l'axe des abscisses, la chute ohmique dans l'inducteur en fonction du courant débité, $u = RI$. Pour une valeur Ob du débit, la portion d'ordonnée C'bC représente la chute de tension produite par la réaction totale d'induit et par la résistance de l'inducteur.

Supposons que le point B d'abscisse Ob soit un point de la caractéristique en charge de la machine série pour le débit Ob.

L'ordonnée bB' représente la f. é. m. due au courant inducteur Ob. Par conséquent, BB' est la chute de tension en charge et BB' = C'C.

Donc on obtiendra le point B, à partir de la caractéristique à vide, en portant B'B = CC'.

7. — Déterminons le rendement à pleine charge de la machine série.

Quand la génératrice fournit 16 ampères, la tension à ses bornes est 174 volts, la puissance utile atteint alors $174 \times 16 \simeq 2\,780$ watts.

a) *Pertes variables.* — Le courant de 16 ampères traverse l'induit dont la résistance est 0,62 ohm à froid et l'inducteur de résistance 0,85 ohm à froid. La puissance perdue est :

$$(0{,}62 + 0{,}85) \times 1{,}25 \times 16^2 = 470 \text{ watts.}$$

b) *Pertes constantes.* — Quand la machine débite 16 ampères, la f. é. m. produite atteint 208 volts d'après la caractéristique à vide.

Pour mesurer les pertes à vide, montons la dynamo en moteur à excitation indépendante; appliquons 210 volts aux bornes de l'induit et

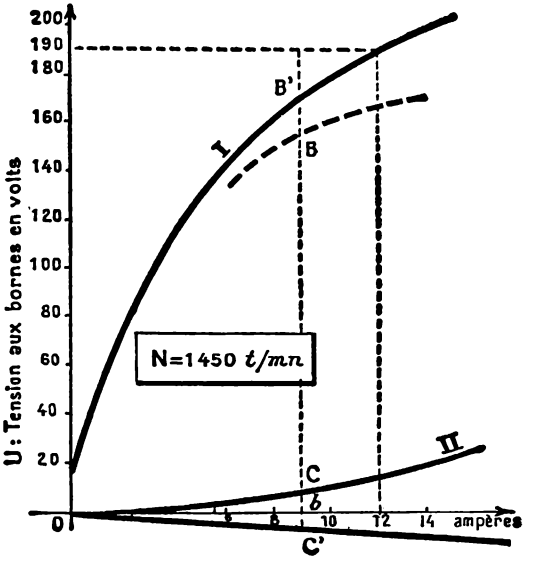


Fig. 5. — Détermination graphique d'un point de la caractéristique en charge d'une dynamo série.
I. Caractéristique à vide.
II. Courbe de réaction totale d'induit.
III. Chute ohmique de tension dans l'inducteur série.

réglons l'excitation pour que la vitesse atteigne 1 450 tours par minute. L'induit absorbe alors $I_0 = 1{,}9$ ampère.

Les pertes mécaniques et magnétiques ont pour valeur :

$$210 \times I_0 - rI_0^2 = (210 - rI_0) \times I_0 = 208\ I_0$$

soit 395 watts.

c) Le *rendement* est donc :

$$\eta = \frac{2\,780}{2\,780 + 470 + 395} = \frac{2\,780}{3\,645} = 0{,}76$$

Dynamo à excitation composée.

1. — Examinons la plaque de bornes d'une dynamo compound.

Elle porte six bornes, deux petites et quatre grosses (fig. 1). Les deux petites sont les bornes de l'enroulement inducteur en dérivation. En « sonnant » les autres, il est facile de repérer les bornes de l'induit et celles de l'enroulement inducteur en série.

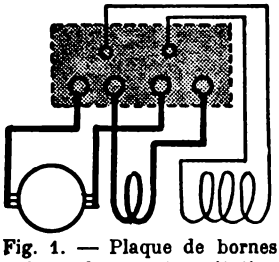


Fig. 1. — Plaque de bornes d'une dynamo à excitation composée.

La machine doit être branchée de manière que les ampères-tours des enroulements en dérivation et en série s'ajoutent. Pour établir la correspondance des bornes inductrices, on peut faire passer un courant de sens connu *successivement* dans l'enroulement shunt et dans l'enroulement série; on applique chaque fois l'une des extrémités d'une tige de fer contre les pièces polaires d'un pôle et l'on approche de l'autre une boussole ou une aiguille aimantée. On reconnaît ainsi la nature du pôle et l'on sait si les effets des deux enroulements sont concordants.

2. — La disposition de la plaque de bornes est la même quand la machine possède des pôles auxiliaires.

Ce sont des pôles inducteurs à surface polaire très étroite qui sont en même nombre que les pôles principaux. Leur rôle est de produire dans les sections de l'induit, au moment où les lames du collecteur auxquelles elles sont connectées passent sous les balais, des f. é. m. égales et opposées aux f. é. m. de commutation.

Un pôle auxiliaire de génératrice a la polarité du pôle principal qui le suit dans le sens du mouvement (fig. 2). L'enroulement des pôles auxiliaires est en série avec l'induit.

Vous constaterez sur la figure que si l'on inverse le courant dans l'induit, soit en changeant le sens de rotation, soit en inversant le courant inducteur, l'aimantation des pôles auxiliaires convient encore pour les nouvelles conditions de marche.

Les connexions de l'enroulement de ces pôles aux bornes de l'induit n'ont donc pas à être modifiées; elles sont faites une fois pour toutes par le constructeur de la machine.

Une dynamo qui possède des pôles auxiliaires se branche donc comme une dynamo qui n'en a pas.

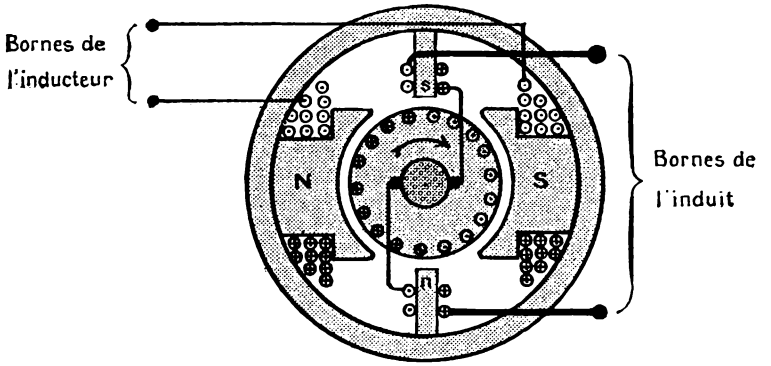


Fig. 2. — Schéma d'une dynamo bipolaire à pôles auxiliaires.

3. — Les essais d'une dynamo compound s'effectuent comme ceux d'une dynamo excitée en dérivation.

Vous déterminerez :

1° les résistances de l'induit, de l'enroulement inducteur en dérivation, de l'enroulement inducteur en série;

2° la caractéristique à vide pour la vitesse normale;

3° la caractéristique en charge avec l'excitation en dérivation seulement, pour la vitesse normale et la f. é. m. égale à la tension normale aux bornes;

4° la caractéristique en charge avec les deux enroulements inducteurs en circuit, dans les mêmes conditions que précédemment;

5° le point à vide en moteur à excitation séparée pour calculer le rendement.

Le rapprochement des deux caractéristiques en charge fait sur la figure 3 montre bien l'effet de l'excitation série.

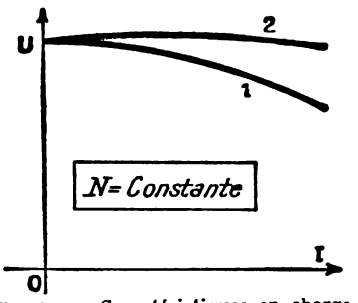


Fig. 3. — Caractéristiques en charge :
1. d'une dynamo shunt,
2. de la même machine compoundée.

4. — Il est possible de déterminer graphiquement le nombre de spires de l'enroulement série pour compounder une machine shunt.

La baisse de tension quand la charge augmente entre les bornes d'une machine shunt est due :

1° à la réaction magnétique de l'induit,

2° à la chute ohmique résultant du passage du courant dans l'enroulement de l'induit;

la somme de ces deux effets se nomme *réaction totale d'induit*;

3° à la diminution du courant d'excitation, conséquence de la baisse de tension aux bornes de l'inducteur.

Cette troisième cause est déclenchée par la réaction totale d'induit, elle disparaît si l'on compense les deux premières. ***Pour compounder une dynamo shunt, il suffit donc de compenser la réaction totale d'induit.***

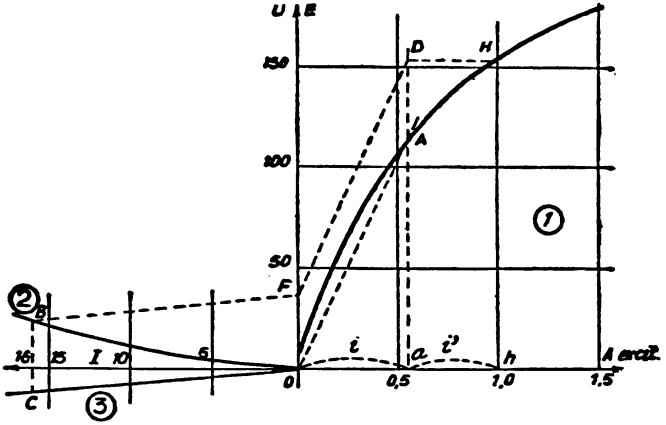


Fig. 4. — Détermination graphique de l'enroulement série d'une machine à compounder.
1. Caractéristique à vide à 2000 t/mn.
2. Courbe de réaction totale d'induit.
3. Chute ohmique prévue dans l'enroulement série. Le point de fonctionnement à vide est A, en charge H.
BC = FO = DA est le supplément de *f. é. m.* à produire en charge.

La valeur u' de la réaction totale d'induit pour un débit I est fournie par la courbe de réaction d'induit de la machine fonctionnant à excitation indépendante (courbe 2 de la figure 4).

La mise en série avec l'induit d'un enroulement inducteur produit, aux bornes de la machine, une chute de tension supplémentaire à peu près de la même valeur que la chute ohmique dans l'induit, soit rI.

Donc pour que la tension aux bornes de la dynamo soit la même quand la charge est I qu'à vide, il faut que la f. é. m. de la machine qui est $E = U$ à vide devienne en charge $E + u' + rI$.

Sur la caractéristique à vide de la machine (courbe 1, figure 4), le point de fonctionnement passe de A à H.

Le courant d'excitation devrait passer de $Oa = i$ à Oh en augmentation de i' si l'on utilisait l'enroulement inducteur seul. Cet enroulement comprend m spires[1]. Le nombre des ampères-tours inducteurs doit être accru de mi'. En employant le courant I de l'induit dans un enroulement en série ajouté à celui qui est en dérivation, il y faudra un nombre de spires n tel que $n = mi' : I$.

Exemple. — Nous avons essayé à vide (27e manipulation), à excitation indépendante, une petite génératrice de 1800 watts, 115 volts, 2 000 tours par minute, et la même machine en charge à excitation indépendante (28e manipulation). La figure 4 représente, à droite de l'axe des ordonnées, la *caractéristique à vide*, et à gauche, la *courbe de réaction totale d'induit*, les ordonnées à la même échelle. Proposons-nous de déterminer le nombre de spires d'une bobine inductrice série à placer sur chaque pôle, ajoutant son action magnétique à celle de la bobine en dérivation, pour qu'à vide et au débit de 16 ampères, la tension entre les bornes de la machine soit 115 volts, sans qu'il soit nécessaire de manœuvrer le rhéostat de champ.

D'après la caractéristique à vide, pour obtenir 115 V à vide, à la vitesse de 2 000 t/mn, il faut un courant d'excitation de 0,55 A.

D'après la courbe de réaction totale d'induit, quand la dynamo débite 16 A, la réaction totale d'induit est 24 V.

D'autre part, dans l'enroulement série auquel on donnera une résistance de 0,81 Ω égale à celle de l'induit, le courant de 16 A produira une chute de tension de $0{,}81 \times 16 = 13$ V.

La f. é. m. en charge doit donc surpasser la f. é. m. à vide de $24 + 13 = 37$ V et devenir $115 + 37 = 152$ V, ce qui exigerait un courant inducteur de 1,00 A dans l'enroulement en dérivation, soit une augmentation de $i' = 1{,}00 - 0{,}55 = 0{,}45$ A.

De renseignements fournis par le constructeur de la dynamo, il résulte que le nombre des spires sur chaque bobine shunt est 2 500, soit $m = 5\,000$ spires au total. Le compoundage devra fournir $0{,}45 \times 5\,000 = 2\,250$ ampères-tours supplémentaires. L'enroulement série comportera $2\,250 : 16 = 140$ spires, soit 70 par pôle.

Ce nombre est très élevé, les bobines série des génératrices compound ne comptent guère qu'une dizaine de spires. C'est que la chute de tension en charge est importante dans le cas de la petite dynamo shunt prise comme exemple et la longueur trop grande de son entrefer oblige à l'emploi de beaucoup d'ampères-tours magnétisants.

1. **Quand le nombre de spires de l'enroulement shunt est inconnu, on peut le déterminer expérimentalement. Sur les bobines inductrices on enroule un petit nombre n' de spires (n' peut être voisin de 50), de manière que les sens d'enroulement soient contraires sur deux bobines voisines. On superpose ainsi à l'enroulement normal de x spires un second enroulement de n' spires. Aux bornes du circuit inducteur normal, on applique une tension alternative U, (U peut être 200 volts), et l'on mesure la tension U' entre les extrémités de l'ensemble des spires ajoutées. Approximativement $\frac{U}{U'} = \frac{x}{n'}$, d'où $x = n' \times \frac{U}{U'}$; x est obtenu à 0,1 près environ.**

Moteur excité en dérivation. Caractéristique de vitesse. Rendement.

Soit à essayer un moteur shunt de 220 volts, 13,6 ampères, 1 525 tours par minute. Il s'agit d'un moteur à carcasse en fonte et coussinets lisses.

Vous savez qu'un moteur à courant continu est construit comme une génératrice. Il peut fonctionner comme génératrice ou comme réceptrice.

Sa caractéristique à vide à excitation séparée se détermine comme il est indiqué dans la 27e manipulation. Cette courbe renseigne sur la constitution magnétique de la machine, mais elle n'est pas indispensable pour connaître les propriétés électromécaniques du moteur.

1. — Mesurez les résistances de l'induit et de l'inducteur.

La mesure faite à la température ambiante a donné les résultats suivants :

DYNAMO SHUNT N°... — RÉSISTANCE DE L'INDUIT

LECTURES				CALCULS		
VOLTMÈTRE		AMPÈREMÈTRE		U	I	U : I
150 div.	Calibre	100 divis.	Shunt			
1	2	3	4	5	6	7
44	15 V	25,5	20 A	4,4 V	5,1 A	0,86 Ω
61,5		36,5		6,15	7,3	0,84
90,5		56		9,05	11,2	0,81

Moyenne : 0,84 ohm.

DYNAMO SHUNT N°... — RÉSISTANCE DES INDUCTEURS

LECTURES				CALCULS		
VOLTMÈTRE		AMPÈREMÈTRE		U	I	U : I
150 div.	Calibre	100 div.	shunt			
1	2	3	4	5	6	7
50	300 V	16,0	2 A	100 V	0,32 A	313 Ω
114,5		36,3		229	0,726	315
125,5		39,5		251	0,79	318

Moyenne : 315 ohms.

2. — Dessinez le schéma du rhéostat de démarrage.

Le modèle dont la figure 1 donne le dessin simplifié est fort employé.

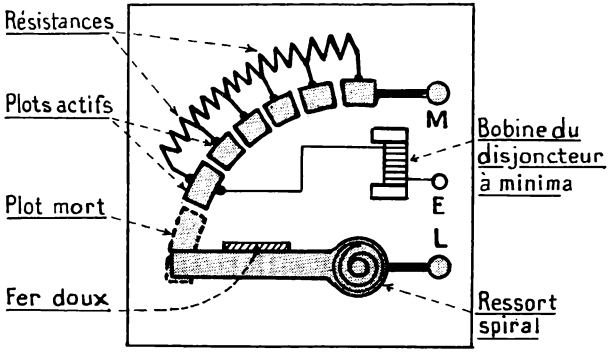


Fig. 1. — Rhéostat de démarrage pour moteur shunt avec disjoncteur à minimum d'excitation.

Vous mesurerez la résistance entre les bornes M et L en plaçant la manette sur le premier plot actif, et la résistance entre les bornes M et E. On a trouvé, par exemple, 12 ohms et 15 ohms : la résistance de la bobine du disjoncteur est donc 3 ohms.

3. — Branchez le moteur pour un sens de rotation déterminé.

Le montage du moteur avec son rhéostat de démarrage sur le réseau à tension constante est effectué suivant le schéma de la figure 2.

En suivant le trajet du courant sur le dessin, vous remarquerez qu'en plaçant la manette sur le premier plot de démarrage, on applique la ten-

sion du réseau directement sur le circuit inducteur, tandis que pour la manette au dernier plot, le rhéostat reste en série avec l'inducteur.

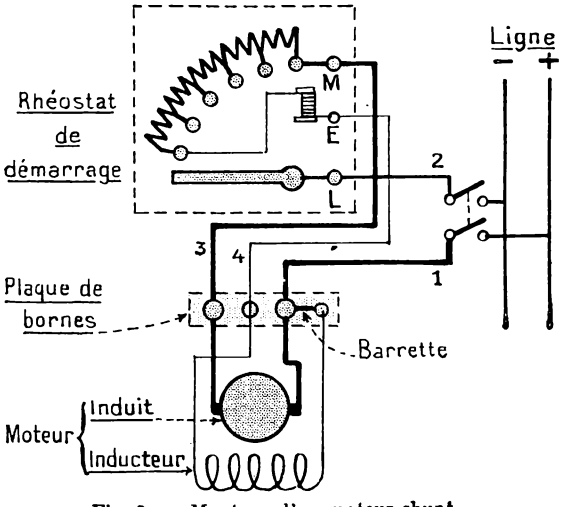


Fig. 2. — Montage d'un moteur shunt.

Dans le cas du moteur et du rhéostat employés, la résistance du circuit inducteur passe de 315 + 3 = 318 ohms à 315 + 3 + 12 = 330 ohms et le courant inducteur de 0,69 ampère à 0,67 ampère.

Quand la manette du rhéostat est sur le premier plot actif, la résistance de démarrage est tout entière en série avec l'induit. Le courant dans l'induit au décollage est donc $I_d = \frac{U}{r + r_d}$.

Pour le moteur essayé $I_d = \frac{220}{0{,}84 + 12} = 17$ ampères, soit 1,25 fois le courant normal, 13,6 ampères.

Le démarrage doit être effectué lentement, surtout si le moteur est puissant, pour que le courant de démarrage ne soit pas excessif.

Pour arrêter le moteur, il convient au contraire de *couper brusquement* le courant à l'interrupteur principal, alors que le moteur est en pleine vitesse pour que la f. c. é. m. de l'induit en mouvement réduise la tension qu'il s'agit de supprimer. L'arrêt peut aussi s'effectuer par le rappel *rapide* de la manette du rhéostat au plot mort.

Remarquez que le circuit de l'inducteur reste toujours fermé sur l'induit. Cette disposition, dite *anti-inductive*, évite la production d'une

tension élevée dans l'inducteur lors de la suppression du courant d'excitation.

Pour *inverser le sens de rotation* du moteur, on renverse le sens du courant soit dans l'induit, soit dans l'inducteur. Comparez la figure 3 à la figure 2 et vous constaterez le changement des connexions.

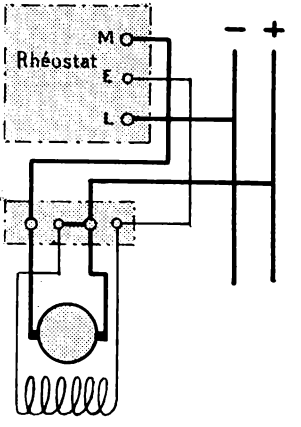


Fig. 3. — Montage d'un moteur shunt. Le sens du courant est inversé dans l'inducteur par rapport au montage de la figure 2.

4. — Déterminez la caractéristique de vitesse du moteur alimenté à tension constante.

Cette caractéristique est la courbe $N = f(I)$, de la vitesse N de l'induit en fonction de l'intensité absorbée I quand la charge varie, la tension U aux bornes restant constante, ainsi que le courant d'excitation i.

La figure 4 est le schéma du montage à réaliser. On charge le moteur en lui faisant entraîner une génératrice shunt qui débite dans un rhéostat. Un ampèremètre A est mis dans le circuit de l'induit, un autre A' en série avec l'inducteur, un voltmètre V sert à mesurer la tension aux bornes.

Trois observateurs opèrent en même temps :

A règle la charge du moteur et lit les indications de l'ampèremètre principal,

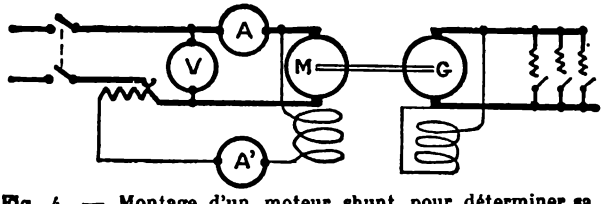


Fig. 4. — Montage d'un moteur shunt pour déterminer sa caractéristique de vitesse.

B mesure la vitesse,

C surveille l'ampèremètre A' et lit le voltmètre V; il donne le signal des mesures et note les lectures dans le tableau suivant :

MOTEUR SHUNT N°... — CARACTÉRISTIQUE DE VITESSE

LECTURES				RÉSULTATS	
Excitation	Ampèremètre 100 divisions shunt : 20 A	Voltmètre 150 divisions calibre : 300V	Vitesse	I	N
1	2	3	4	5	
0,60 A	6	110	1 690 t/mn	1,2 A	1 690 t/mn
0,60	15	110	1 683	3,0	1 683
0,61	25	112	1 700	5,0	1 673
0,60	41,5	110	1 660	8,3	1 660
0,60	68	110	1 590	13,6	1 590
0,60	84	110	1 520	16	1 520

La perte de vitesse de la marche à vide à la marche à pleine charge est de 6,7 %; elle serait moindre si le moteur était plus puissant.

Pour tracer la courbe, on représente en abscisses 1 ampère par 1 centimètre et en ordonnées 100 tours par minute par 1 centimètre (fig. 5).

5. — Le rendement d'un moteur se calcule par la méthode des pertes séparées comme celui d'une génératrice.

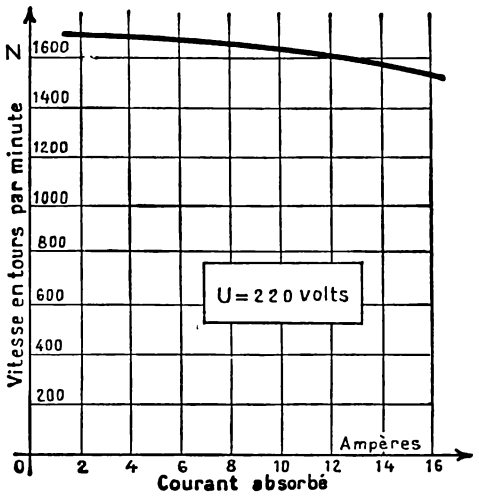


Fig. 5. — Caractéristique de vitesse, N = *f* (I) d'un moteur shunt.

On se donne la puissance totale P_t watts absorbée par le moteur, on évalue les pertes p variables et constantes et on calcule le rendement η

$$\eta = \frac{P_t - p}{P_t}$$

Le moteur est alimenté à la tension U, l'intensité absorbée $I_t = P_t : U$ comprend l'intensité dans l'inducteur $i = U : R$ et l'intensité dans l'induit $I = I_t - i$.

Les *pertes variables* avec la charge sont les pertes en chaleur Joule dans l'induit $p_i = rI^2$ et dans l'inducteur $p^d = Ui$.

Pour obtenir les *pertes constantes*, mécaniques et magnétiques, on fait tourner le moteur à vide à la vitesse de régime N pour qu'il produise la même f. c. é. m. qu'en charge et l'on mesure la puissance absorbée par l'induit dont on déduit la faible puissance perdue en chaleur Joule.

En charge, I étant le courant dans l'induit de résistance r et U la tension aux bornes, la f. c. é. m. a sensiblement pour valeur

$$E' = U - rI.$$

C'est la tension que l'on applique aux bornes de l'induit du moteur à vide. On règle l'excitation pour obtenir la vitesse N. Le courant dans l'induit est alors I_o. La valeur des pertes constantes est donc :

$$p_c = E' I_o - r I_o^2$$

La résistance à chaud de l'induit du moteur essayé est $0,84 \times 1,25 = 1,05$ ohm. La f. c. é. m. à pleine charge a pour valeur

$$E' = 220 - 13,6 \times 1,05 = 206 \text{ volts}$$

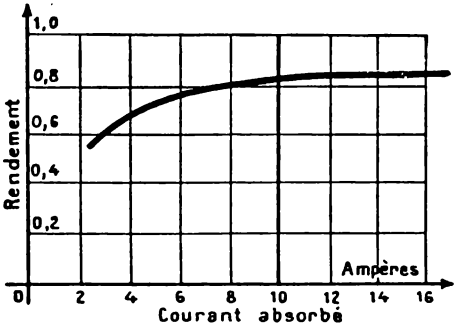


Fig. 6. — Courbe du rendement d'un moteur shunt en fonction du courant total absorbé.

Avec 207 volts à ses bornes, à 1 525 tours par minute, le moteur absorbe 0,90 ampère. Les pertes constantes s'élèvent à 185 watts.

A pleine charge, le moteur absorbe 13,6 ampères sous 220 volts, soit

$$220 \times 13,6 \simeq 3\,000 \text{ watts.}$$

La résistance à chaud du circuit inducteur atteint :

$$315 \times 1,25 = 394 \text{ ohms}$$

et le courant d'excitation 220 : 394 = 0,56 ampère

Le courant dans l'induit a pour valeur :

$$13,6 - 0,56 \simeq 13 \text{ ampères.}$$

Le calcul des pertes en chaleur Joule donne :

$$p_i = 1,05 \times 13^2 = 177 \text{ watts}$$
$$p_d = 220 \times 0,56 = 123 \text{ watts.}$$

Le rendement du moteur à pleine charge est donc

$$\eta = \frac{3000 - (177 + 123 + 185)}{3000} = 0,83$$

Le rendement est calculé dans le tableau suivant pour sensiblement

$$\frac{1}{4}, \quad \frac{2}{4}, \quad \frac{3}{4}, \quad \frac{4}{4}, \quad \frac{5}{4},$$

de la charge normale du moteur.

MOTEUR SHUNT N°... — RENDEMENT A DIVERSES CHARGES

I	i	I_i	P_i	p_i	p_d	p_c	$p = p_i + p_d + p_c$	$P_i - p$	n
3,25	0,56	3,81	840	11	123	185	319	521	0,62
6,50	0,56	7,06	1 540	44	123	185	352	1 188	0,77
9,75	0,56	10,31	2 270	100	123	185	408	1 862	0,82
13,0	0 56	13,6	3 000	177	123	185	485	2 515	0,83
16,25	0 56	16,80	3 700	277	123	185	585	3 115	0,84

Remarquez que le rendement à toutes charges est élevé : c'est que le moteur est d'ancienne construction, il possède des enroulements largement dimensionnés, le courant d'excitation est faible, il n'y a pas de ventilateur sur l'induit.

La figure 6 est la courbe de ce rendement en fonction du courant total absorbé par le moteur.

Moteur excité en dérivation. Caractéristique de couple. Couple de démarrage.

Le moteur fonctionne sous la tension constante U. Nous nous proposons de déterminer la caractéristique électro-mécanique $\mathcal{M} = f$ (I) qui est la courbe du moment du couple moteur en fonction de l'intensité absorbée par la machine.

1. — On mesure directement les couples moteurs avec des freins mécaniques.

Le ***frein de Prony*** et le frein à sangle sont étudiés dans le cours de mécanique[1]. Nous emploierons le frein de Prony à l'étude d'un moteur asynchrone triphasé (43e manipulation).

On peut utiliser aussi une ***dynamo-frein.*** C'est une dynamo à excitation indépendante dont l'inducteur tout entier peut tourner librement d'un certain angle autour de l'arbre de l'induit. Pour obtenir cette mobilité, la carcasse inductrice est montée sur des roulements à billes portés par les paliers. Un bras horizontal est disposé perpendiculairement à l'axe de rotation (fig. 1); il est muni d'un plateau pour recevoir des poids; l'ensemble est équilibré au repos par un contrepoids.

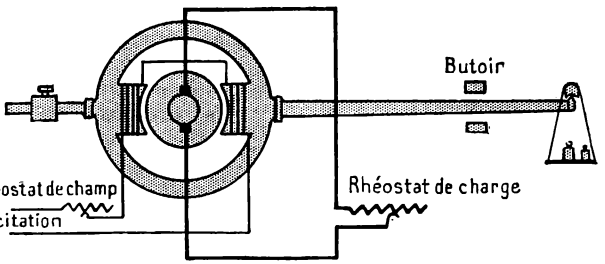


Fig. 1. — Schéma d'une *dynamo-dynamomètre* ou *dynamo-frein.* L'inducteur entier peut osciller librement autour de l'induit.

L'induit de la machine est manchonné sur

1. Voir Mécanique, 2e partie, par Basquin, 3e leçon (Delagrave, éditeur).

l'arbre du moteur à essayer. La mesure d'un couple s'effectue comme avec un frein de Prony. Les forces électromagnétiques qui s'exercent entre l'inducteur et l'induit jouent le même rôle que les forces de frottement qui s'exercent entre la jante de la poulie et le sabot du frein de Prony. Elles exercent :

Sur l'induit, un couple résistant qui équilibre le couple moteur du moteur électrique essayé;

Sur l'inducteur, un couple de même moment (au signe près) qui tend à entraîner cet inducteur dans le même sens de rotation que l'induit et qui est équilibré par les poids disposés dans le plateau.

On modifie ce couple à volonté en faisant débiter la dynamo-frein dans un rhéostat de charge.

Une dynamo-frein est plus commode qu'un frein de Prony parce que la transformation de l'énergie mécanique en chaleur s'y fait par l'intermédiaire du courant électrique bien plus facile à régler qu'un frottement, et que la chaleur est dissipée dans des rhéostats de charge et non dans des parties actives du frein.

Toutefois la sensibilité d'une dynamo-frein est assez faible à cause du poids de l'induit.

Un autre frein, moins coûteux, est le ***moulinet Renard.*** Il se compose d'une barre rectangulaire en bois manchonnée sur l'arbre du moteur et portant de part et d'autre, à la même distance de l'arbre, deux plaques en aluminium disposées parallèlement à l'axe du moteur (fig. 2).

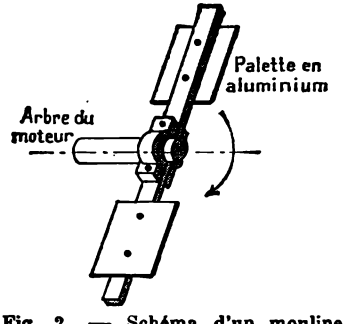


Fig. 2. — Schéma d'un moulinet Renard.

Plus les palettes sont grandes, plus elles sont écartées l'une de l'autre, plus est grande la puissance absorbée par le frein à une vitesse déterminée. On évalue cette puissance à l'aide de diagrammes et de barèmes établis par le constructeur du moulinet.

2. — Déterminons indirectement le couple [1] du moteur étudié en nous servant de la caractéristique des vitesses et de la courbe du rendement.

Quand le courant dans le moteur est I et la tension aux bornes U, la puissance absorbée est UI et la puissance restituée sur l'arbre

$$UI\,\eta \text{ watts.}$$

1. Pour abréger on dit *couple* pour *moment du couple* lorsque aucune ambiguité n'est possible.

En désignant par $\mathcal{M}$ le moment du couple en mètres newtons[1] du moteur et par N sa vitesse en tours par minute, une autre expression de cette puissance est

$$\frac{2\pi N \mathcal{M}}{60} \text{ Watts}$$

Donc

$$\frac{2\pi N \mathcal{M}}{60} = UI\eta$$

d'où

$$\mathcal{M} = 9{,}59 \frac{UI\eta}{N} \text{ mètres-newtons (m.N)}$$

Dans le cas du moteur essayé, on trouve pour différentes intensités les valeurs suivantes du couple :

MOTEUR SHUNT N°... — COUPLE MOTEUR A DIVERSES CHARGES

U	I	η	N	$\mathcal{M}$
220 V	3,81 A	0,62	1 680 t/mn	2,96 m.N
220	7,06	0,77	1 660	6,27 —
220	10,31	0,82	1 635	10,8 —
220	13,6	0,83	1 590	15,0 —
220	16,80	0,84	1 520	18,6 —

La courbe $\mathcal{M} = f(I)$ est représentée par la figure 3. C'est une droite. On établit, en effet, théoriquement que le couple d'un moteur à courant continu est $\mathcal{M} = k\Phi I$. Dans le cas d'un moteur shunt alimenté à tension constante, le flux inducteur Φ est invariable; donc le couple est proportionnel à l'intensité absorbée.

3. — Avec la caractéristique de couple et la caractéristique de vitesse, traçons la courbe des valeurs du couple en fonction de la vitesse.

Cette courbe, $\mathcal{M} = F(N)$ se nomme une *caractéristique mécanique* du moteur.

Pour en obtenir un point, il suffit de relever sur les courbes $\mathcal{M} = f(I)$ et $N = \varphi(I)$ deux valeurs correspondantes de $\mathcal{M}$ et de N que l'on porte respectivement en ordonnée et en abscisse.

1. La nouvelle unité de force est le Newton (*N*) 1 *kilogramme force* = 9,8 *newtons*. On a donc 1 mètre-kilogramme = 9,8 m.N.

Pour le moteur étudié, on trouve

MOTEUR SHUNT N°... — CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE

N	1 520	1 590	1 636	1 660	1 680 t/mn
$\mathcal{M}$	18,6	15,0	10,8	6,27	2,96 m.N

La caractéristique mécanique est représentée par la figure 4.

4. — Mesurons le couple de démarrage pour différentes valeurs de l'intensité dans l'induit.

C'est le moment du couple que l'induit produit sur son arbre quand,

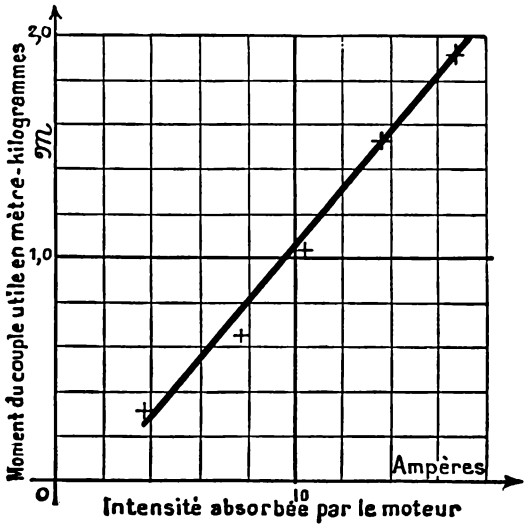


Fig. 3. — Caractéristique électromécanique,
les moments sont portés en mètres-kilogrammes (m. kg) :
1 m.kg = 9,8 m.N

à l'arrêt, il est traversé par un courant I, alors que l'inducteur est parcouru par le courant normal d'excitation.

Pour le mesurer, bloquons une barre de bois BAC longue de 2 mètres sur la poulie du moteur à l'aide de deux sabots S et S' (fig. 5). L'ex-

trémité B est reliée par une ficelle verticale à un plateau d'une balance placée au-dessus de la barre.

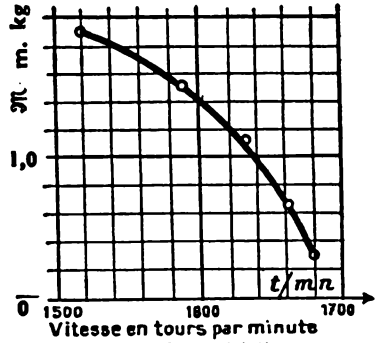


Fig. 4. — Caractéristique mécanique, $\mathcal{M} = F(N)$ d'un moteur shunt.

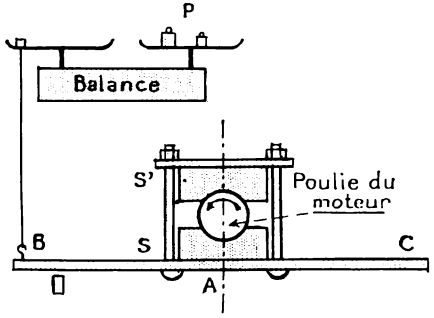


Fig. 5. — Frein bloqué pour mesurer le couple de démarrage d'un moteur

L'inducteur du moteur est branché sur la ligne à la tension normale U. Un ampèremètre et un rhéostat de réglage sont en série avec l'induit (fig. 6).

L'intensité dans l'induit est réglée à une valeur déterminée I. Le bras de levier AB tire sur le plateau de la balance. Pour rétablir l'équilibre il faut charger l'autre plateau d'un poids P. Puisque AB mesure 1 mètre, P est la valeur du moment du couple de démarrage à l'intensité I.

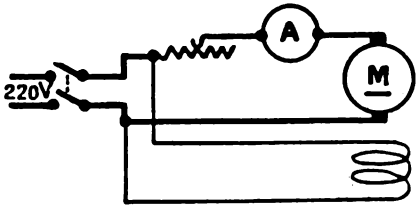


Fig. 6. — Branchement d'un moteur shunt pour mesurer son couple de démarrage.

Nous avons trouvé pour le moteur essayé les résultats suivants :

MOTEUR SHUNT N° ... — COUPLE DE DÉMARRAGE

TENSION d'excitation	INTENSITÉ dans l'induit	COUPLE de démarrage
1	2	3
220 V	3,25 A	4,45 m.N
220	6,70	8,80
220	10,30	13,2
220	13,80	17,1
220	17,40	22,3

La mesure n'est pas précise. Le poids placé sur la balance peut varier

de 90 grammes sans modifier l'équilibre, parce que l'arbre frotte dans ses coussinets et les balais sur le collecteur.

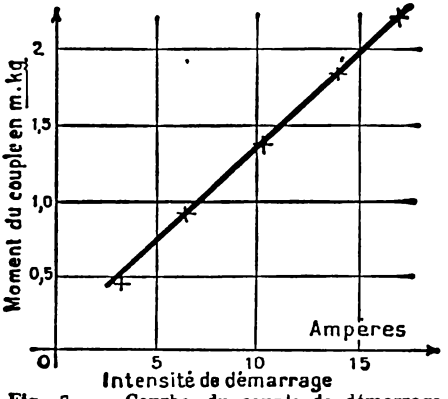


Fig. 7. — Courbe du couple de démarrage d'un moteur shunt en fonction du courant dans l'induit.

La figure 7 représente la variation du couple de démarrage en fonction du courant dans l'induit. C'est une droite.

Remarquons qu'à intensité égale le couple est un peu plus grand à l'arrêt qu'en marche, parce que les pertes mécaniques sont nulles quand l'induit ne tourne pas.

Moteur excité en série. Caractéristique de vitesse. Rendement.

Attention! Attention!

Un moteur série, quand il n'est pas de très faible puissance, alimenté à tension constante, s'emballe à vide; la vitesse devient tellement grande que l'induit est détruit par la force centrifuge.

Pour éviter cet accident, les moteurs série ne s'emploient que manchonnés directement ou accouplés par engrenages avec les machines qu'ils entraînent et qui, automatiquement, les freinent.

Quand, pour l'essai d'un moteur série, on lui fait commander une dynamo par courroie, il faut craindre la chute de la courroie et, soit protéger le moteur par un disjoncteur à minimum d'intensité, soit confier à quelqu'un de sûr le soin de surveiller la machine et de couper le courant d'alimentation s'il est nécessaire.

1. — Mesurons les résistances de l'induit et de l'inducteur.

La machine essayée est celle qui a servi de génératrice série, 220 volts, 13,6 ampères, 1 450 tours par minute (31e Manipulation).

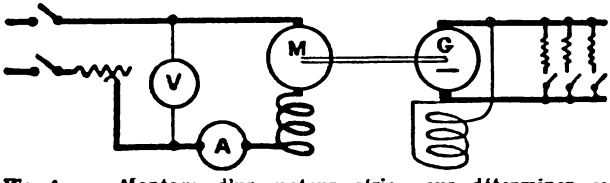


Fig. 1. — Montage d'un moteur série pour déterminer sa caractéristique de vitesse.

La mesure des résistances, à la température ordinaire, a donné

induit : 0,62 ohm;
inducteur : 0,85 ohm;

soit à chaud, pour une augmentation de température de 60° :

induit : $r = 0{,}62 \times 1{,}25 = 0{,}77$ ohm;
inducteur : $R = 0{,}85 \times 1{,}25 = 1{,}06$ ohm.

Au total : 1,83 ohm.

2. — Déterminons la caractéristique de vitesse du moteur alimenté à tension constante.

Le moteur entraîne une dynamo excitée en dérivation qui débite dans un rhéostat de charge métallique. Un ampèremètre est en série avec le moteur et un voltmètre monté à ses bornes (fig. 1).

L'essai est conduit comme celui d'un moteur shunt. Sans donner le détail des lectures faites, indiquons les résultats obtenus sous 220 volts :

MOTEUR SÉRIE n°... — CARACTÉRISTIQUE DE VITESSE

I	4	7,4	9,8	13,1	14 ampères
N	2 430	1 940	1 660	1 460	1 410 t/mn

La figure 2 représente la caractéristique de vitesse $N = f(I)$. Elle a l'aspect d'une branche d'hyperbole.

3. — Effectuons un essai à vide pour déterminer les pertes constantes du moteur.

Quand le moteur fonctionne normalement à 220 volts, en absorbant 13,6 ampères, sa f. c. é. m. est :

$$E' = U - (r + R)\,I = 220 - 1{,}83 \times 13{,}6 = 195 \text{ volts.}$$

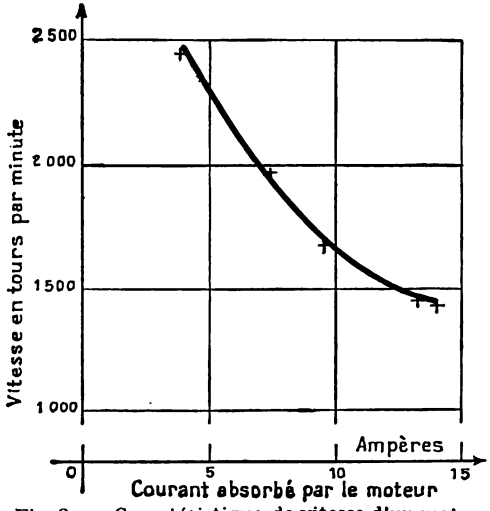


Fig. 2. — Caractéristique de vitesse d'un moteur série.

Montons-le à excitation séparée, appliquons 196 volts aux bornes de l'induit, réglons l'excitation pour obtenir la vitesse de 1 450 tours par minute, et mesurons l'intensité absorbée dans l'induit; nous trouvons 1,7 ampère.

La puissance dissipée en pertes mécaniques et magnétiques est donc

$$195 \times 1{,}7 - 0{,}77 \times 1{,}7^2 = 330 \text{ watts.}$$

4. — Calculons le rendement par la méthode des pertes séparées pour différentes fractions de la charge normale.

En procédant comme

pour le moteur shunt, nous trouvons pour notre moteur série fonctionnant sous 220 volts :

MOTEUR SÉRIE N° ... — RENDEMENT A DIVERSES CHARGES

Intensité absorbée I	Puissance absorbée $P_t = UI$	Pertes constantes p_o	Pertes variables $(R + r)\ I^2$	Total des pertes p	Puissance utile P_n	Rendem. η
1	2	3	4	5	6	7
4	880	330	29	359	521	0,59
7,4	1 620	330	100	430	1 190	0,73
9,8	2 160	330	176	506	1 654	0,75
13,1	2 880	330	314	644	2 236	0,78
14,0	3 080	330	360	690	2 390	0,78
17,5	3 850	330	560	860	2 990	0,78

La courbe de ce rendement en fonction de I est dessinée figure 3.

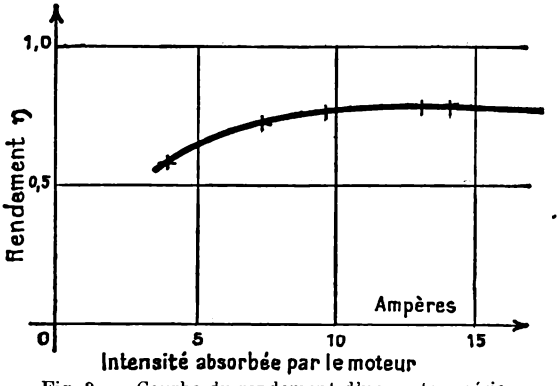


Fig. 3. — Courbe du rendement d'un moteur série.

Remarquez que le rendement du moteur est un peu supérieur à celui de la même machine fonctionnant en génératrice.

Moteur excité en série. Caractéristique de couple. Couple de démarrage.

1. — Calculons le couple à différentes charges à l'aide des courbes de vitesse et de rendement.

La puissance absorbée par le moteur est UI watts, la puissance utile sur l'arbre UI η watts.

En désignant par $\mathfrak{M}$ le moment du couple en mètres-kilogrammes et par N le nombre de tours de l'induit par minute, nous avons établi que :

$$\mathfrak{M} = 9{,}59\,\frac{UI\eta}{N}\,m.N, \qquad \text{soit} \qquad 0{,}973\,\frac{UI\eta}{N}\,m.\ kg.$$

Les résultats obtenus avec les valeurs de η et de N mesurées dans la manipulation précédente sont :

MOTEUR SÉRIE N°... — COUPLE MOTEUR A DIVERSES CHARGES

I 1	U 2	UI 3	η 4	UIη 5	N 6	$\mathfrak{M}$ 7
4,0	220	880	0,59	520	2 430	0,21
7,4	220	1 630	0,73	1 190	1 940	0,60
9,8	220	2 160	0,75	1 650	1 660	0,97
13,1	220	2 880	0,78	2 240	1 460	1,49
14,0	220	3 080	0,78	2 390	1 410	1,65
17,5	220	3 850	0,80	2 990	1 350	2,15

La figure 1 représente, en trait continu, la caractéristique $\mathfrak{M} = f(I)$. Le couple croît d'abord plus vite que le courant, puis, à partir de I = 10 ampères, il est proportionnel à l'intensité à cause de la saturation de la carcasse magnétique.

2. — Traçons la caractéristique mécanique $\mathcal{M} = \varphi$ (N).

Les valeurs correspondantes de N et de $\mathcal{M}$ sont inscrites dans les colonnes 6 et 7 du tableau ci-dessus.

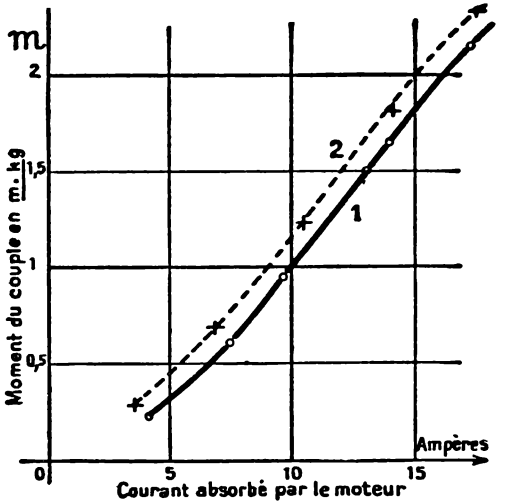


Fig. 1. — Caractéristique électromécanique de couple, $\mathcal{M} = f(I)$ d'un moteur série.
2. — Courbe du couple de démarrage.
Les moments sont en m kg : 1 mkg = 9,8 mN.

La courbe tracée figure 2 montre que le couple augmente beaucoup quand le moteur ralentit à cause de sa charge.

3. — Déterminons le couple de démarrage.

Nous employons le même dispositif expérimental que pour le moteur shunt : frein bloqué avec bras de levier de 1 mètre et balance.

Les résultats obtenus sont les suivants :

MOTEUR SÉRIE N°... — COUPLE DE DÉMARRAGE

I	3,5	6,9	10,4	14	17,5 ampères
$\mathcal{M}$	0,280	0,700	1,210	1,800	2,480 mètres-kilogrammes

Les mesures sont peu précises et l'on constate que le couple dû au

frottement de l'arbre dans ses paliers à bague varie de 0,125 à 0,190 mètre-kilogramme quand l'intensité passe de 3,5 à 17,5 ampères.

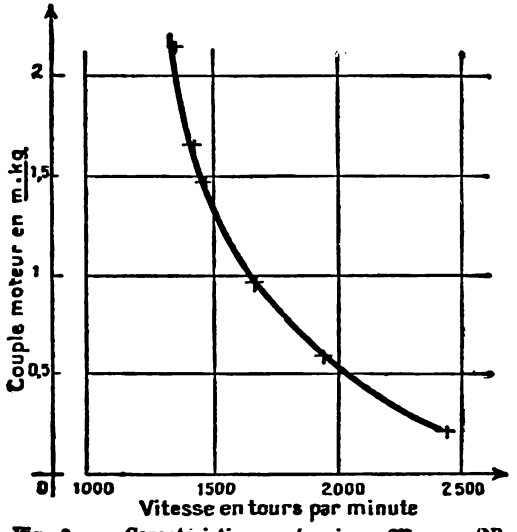


Fig. 2. — Caractéristique mécanique $\mathcal{M} = \varphi$ (N) d'un moteur série. Le couple moteur croît rapidement quand la vitesse diminue.

La courbe de ce couple est tracée en pointillé dans la figure 1.

On voit qu'il varie comme le couple en marche en lui restant toujours un peu supérieur.

Moteur à excitation composée. Caractéristiques et rendement.

Le moteur à essayer est d'une puissance de 2 chevaux en service continu. Il est construit pour 115 volts et 1 600 tours par minute. D'après des renseignements fournis par le constructeur, il porte, sur chacun de ses deux pôles, 2 200 spires pour l'enroulement en dérivation et 55 pour l'enroulement en série.

Pour démarrer un moteur compound, on se sert d'un rhéostat de moteur shunt. La figure 1 indique comment s'effectue le câblage. Au préalable, il faut repérer les bornes ainsi qu'il a été indiqué pour une génératrice compound et connecter l'enroulement série à l'induit pour que le champ qu'il produit s'ajoute à celui de l'enroulement shunt. On dit que le moteur fonctionne alors à *flux totalisés*.

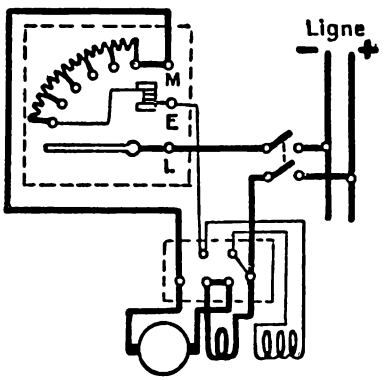


Fig. 1. — Câblage d'un moteur compound muni de son rhéostat de démarrage

La figure 2, qui schématise davantage le branchement, montre que le courant total I_t pris au réseau par le moteur est la somme du courant I dans l'inducteur série et l'induit et du courant i dans l'inducteur en dérivation. Le courant i est constant quand le moteur est alimenté à tension constante et n'est pas muni d'un rhéostat de champ.

Pour charger le moteur, on lui fait entraîner une génératrice à courant continu qui débite dans un rhéostat de charge. La façon d'effectuer les mesures a été suffisamment décrite dans des manipulations précédentes pour que nous indiquions seulement les résultats obtenus.

1. — La résistance des différents circuits de la machine est d'abord mesurée.

A la température ordinaire, les mesures ont donné :

Inducteurs en dérivation : 105; 104; 103 Ω; soit en moyenne 104 Ω.

Inducteurs en série : 0,216; 0,218; 0,219 Ω; soit en moyenne 0,22 Ω.

Induit : 0,88; 0,82; 0,78 Ω; soit en moyenne 0,83 Ω.

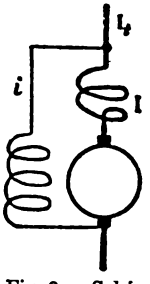


Fig. 2. — Schéma d'un moteur compound $I = I_1 + i$.

Remarquez que la précision de ces mesures est bonne dans le cas des circuits inducteurs, médiocre pour l'induit. La résistance de l'induit comprend, en effet, la résistance de contact des balais qui varie quand on tourne un peu le collecteur pour passer d'une mesure à une autre.

En supposant que la température de la machine s'élève d'environ 60° en régime continu, les résistances atteignent :

Inducteurs en dérivation : 104 × 1,25 = 130 ohms,
Inducteurs en série : 0,22 × 1,25 = 0,27 ohm,
Induit : 0,83 × 1,25 = 1,04 ohm.

2. — Déterminons la caractéristique de vitesse N = f (I).

On fait croître le débit dans le rhéostat de charge de la dynamo shunt entraînée par le moteur.

Deux séries de mesures sont effectuées :

a) ***L'enroulement en dérivation est seul en circuit*** et l'enroulement série n'est pas utilisé.

Les lectures faites et les résultats trouvés ont été les suivants :

MOTEUR COMPOUND N°... — CARACTÉRISTIQUE DE VITESSE
Inducteur en dérivation seul en circuit

LECTURES				RÉSULTATS	
TENSION Voltm. 150 div. calibre 150 V	EXCITATION Ampèrem. 100 div. shunt 2 A	INT. ABSORBÉE Ampèrem. 100 div. shunt : 20 A	VITESSE	I_1	N
1	2	3	4	5	6
115	40	20,0	1 400	4,0 A	1 400 t/mn
115	40	35,0	1 390	7,0	1 390
115	40	65,0	1 350	13,0	1 350
115	40	73,0	1 340	14,6	1 340
115	40	85,0	1 330	17,0	1 330

La caractéristique est tracée en trait continu dans la figure 3. La vitesse diminue de 70 tours par minute, soit 5 %, de la marche presque à vide à la marche à pleine charge.

b) ***L'inducteur série est ajouté à l'induit.***

Pour différentes charges du moteur, on a obtenu

MOTEUR COMPOUND N°... — CARACTÉRISTIQUE DE VITESSE
Inducteur en dérivation et inducteur série en circuit

LECTURES				RÉSULTATS	
TENSION Voltmètre : 150 div. calibre :150V	EXCITATION SHUNT Ampèrem. : 100 div. shunt : 2 A	INT. ABSORBÉE Ampèrem. 100 div. shunt : 20 A :	VITESSE	I_t	N
115	40	18,5	1 350	3,7 A	1 350 t /mn
115	40	45,5	1 260	9,1	1 260
115	40	60,0	1 180	12,0	1 180
115	40	69,0	1 130	14,0	1 130
115	40	85,0	980	17,0	980

La caractéristique N = *f* (I) est tracée en pointillé dans la figure 3. La courbe montre que la vitesse d'un moteur compound diminue beaucoup (en l'espèce de 27 %), quand la charge augmente et que la machine, à la différence du moteur série, ne s'emballe pas à vide.

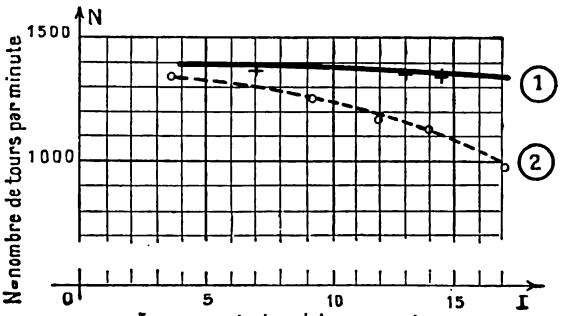


Fig. 3. — Caractéristiques de vitesse d'un moteur compound
1. avec l'excitation en dérivation seule.
2. avec excitation composée.

3. — Afin de calculer le rendement du moteur, effectuons le point à vide.

Quand le moteur absorbe une intensité totale de 14 ampères, 0,8 ampère passe dans l'inducteur en dérivation et 14 — 0,8 = 13,2 ampères dans l'enroulement série et l'induit. Sa f. c. é. m. est environ

$$E' = U - (R + r)\, I = 115 - 1,31 \times 13,2 \simeq 98 \text{ volts.}$$

Il tourne à 1 130 tours par minute.

Montons l'inducteur en dérivation à excitation séparée; appliquons 99 volts aux bornes de la machine, induit et inducteur série compris; réglons l'excitation pour ajuster la vitesse à 1 130 tours par minute et mesurons l'intensité I_o absorbée par l'induit : nous trouvons $I_o = 1{,}30$ ampère.

Les pertes constantes, mécaniques et magnétiques, sont donc :

$$99 \times 1{,}30 - 1{,}30 \times \overline{1{,}30}^2 \simeq 126 \text{ watts.}$$

4. — Calculons le rendement pour différentes charges du moteur.

Nous tiendrons compte des pertes dans l'inducteur en dérivation le courant est 0,8 ampère, la tension aux bornes 115 volts, la puissance perdue $p_d = 115 \times 0{,}8 = 92$ watts est la même à toutes charges.

De l'intensité totale I_t absorbée par le moteur, la fraction

$$I = I_t - i = I_t - 0{,}8$$

passe dans l'inducteur série et l'induit et y produit une perte en chaleur Joule $p_i = (R + r) I^2$.

Les calculs sont résumés dans le tableau suivant :

MOTEUR COMPOUND N°... — RENDEMENT A DIVERSES CHARGES

Intensité totale absorbée	Courant dans l'induit et l'inducteur série	Puissance absorbée	Pertes mécaniques et magnétiques	Pertes dans les inducteurs en dérivation	Pertes dans l'induit et l'inducteur série	Pertes totales	Puissance utile	Rendement
I_t	I	P	p_o	p_d	p_i	p	P_u	η
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,7 A	2,9 A	426 W	126 W	92 W	11 W	229 W	197 W	0,46
9,1	8,3	1 046	126	92	90	308	738	0,70
12,0	11,2	1 380	126	92	165	383	997	0,72
14,0	13,2	1 610	126	92	228	446	1 164	0,73
17,0	16,2	1 950	126	92	344	562	1 388	0,71

La figure 4 représente la courbe de ce rendement tracée en fonction de l'intensité totale absorbée par le moteur. Le rendement passe par un maximum pour 14 ampères.

5. — Calculons le couple du moteur en utilisant sa vitesse et son rendement.

Nous savons que la valeur de ce couple est :

$$\mathcal{M}_b = 9{,}59 \frac{UI_t\eta}{N} m.N \qquad \text{ou} \qquad 0{,}973 \frac{UI_t\eta}{N} m.kg.$$

Les calculs sont résumés ainsi :

MOTEUR COMPOUND N°... — COUPLE MOTEUR A DIVERSES CHARGES

U 1	I_i 2	η 3	$UI_i\eta$ 4	N 5	$\mathfrak{M}$ 6
115	3,7	0,46	196	1 350	0,140 m.kg.
115	9,1	0,70	733	1 260	0,566
115	12,0	0,73	993	1 180	0,812
115	14,0	0,72	1 158	1 130	1,000
115	17,0	0,71	1 387	980	1,375

La caractéristique $\mathfrak{M}$ (I) est représentée par la figure 5. L'action de l'enroulement série se marque par l'augmentation du couple aux fortes charges.

Avec les valeurs N et $\mathfrak{M}$ des colonnes 5 et 6 du tableau ci-dessus, nous traçons la caractéristique mécanique $\mathfrak{M}$ (N) : c'est la figure 6.

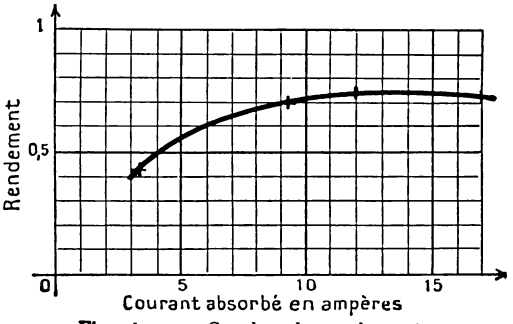


Fig. 4. — Courbe du rendement d'un moteur compound.

6. — Mesurons le couple de démarrage, induit calé.

Le dispositif expérimental est celui que nous avons employé dans des manipulations antérieures.

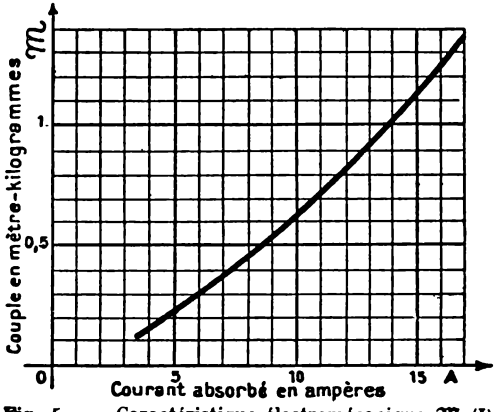


Fig. 5. — Caractéristique électromécanique $\mathfrak{M}$ (I) d'un moteur compound.

Effectuons une première série de mesures en mettant l'enroulement série hors circuit. L'excitation en dérivation utilisée seule est maintenue à la valeur constante 0,8 ampère. Le couple est mesuré pour plusieurs valeurs de l'intensité totale absorbée. Nous avons trouvé :

I_t	3,6	7	9	14,6	17	ampères
$\mathfrak{M}$	0,250	0,454	0,576	0,880	1,000	mètres-kilogrammes

Les mesures sont faciles et précises parce que le frottement dans les roulements à billes est très faible.

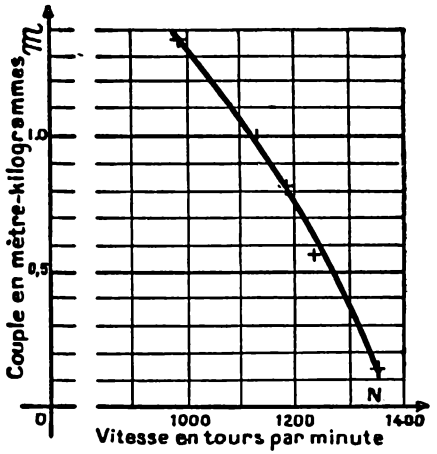


Fig. 6. — Caractéristique mécanique $\mathfrak{M}$ (N) du couple en fonction de la vitesse d'un moteur compound.

Une seconde série de mesures est effectuée en utilisant l'excitation composée. Elle a donné :

I_t	3,6	7	9	14,6	1,72	ampères
$\mathfrak{M}$	0,300	0,560	0,730	1,310	1,550	mètres-kilogrammes

Les deux courbes sont tracées figure 7. Leur rapprochement marque de façon nette l'action de l'excitation en série.

7. — Conclusion.

L'étude qui précède montre que les propriétés du moteur compound à flux totalisés ne sont pas très différentes de celles du moteur en déri-

vation. Ces moteurs sont employés dans le cas de couples résistants

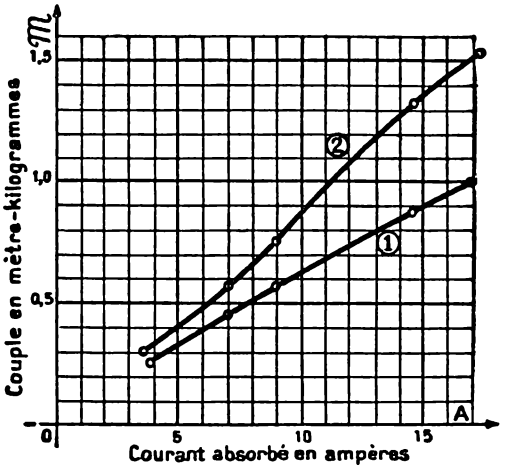


Fig. 7. — Couple de démarrage d'un moteur compound
1. avec exitation en dérivation seule.
2. avec exitation composée.

variables, par exemple à la commande de marteaux-pilons ou de laminoirs.

Rappelons qu'en opposant le champ d'un enroulement série de peu de spires à celui d'un enroulement shunt, on réalise des moteurs compound à vitesse constante. Ils sont peu utilisés.

Transformateur monophasé.

Résistance des enroulements. Essai à vide. Essai en charge.

Le transformateur essayé est petit, il a une puissance de 1 200 volts-ampères, avec des tensions de 200 et 65 volts à 50 périodes par seconde. L'un des enroulements comprend 600 spires et l'autre 200.

1. — Mesurons les résistances des deux enroulements.

A cause de l'inductance des bobines, il faut employer du *courant continu.*

Parce que le transformateur est peu puissant, les résistances à mesurer ne sont pas très petites : nous les mesurons avec un ampèremètre et un voltmètre (montage amont), en utilisant comme source de courant une batterie d'accumulateurs de 4 volts.

Les résultats obtenus sont les suivants :

TRANSFORMATEUR N°... — RÉSISTANCE DU CIRCUIT HAUTE TENSION

LECTURES				RÉSULTATS			
Ampèr. n° 75 931 100 divisions Lectures	shunt	Voltm. n° 61 980 150 divisions Lectures	Calibre	I	U	$R = \frac{U}{I}$	Moyenne
1	2	3	4	5	6	7	8
23,5	10 A	33	7,5 V	2,35 A	1,65 V	0,70 Ω	
43		59		4,30	2,95	0,686	0,69 Ω
52		70,5		5,20	3,53	0,680	

RÉSISTANCE DU CIRCUIT BASSE TENSION

5,5	20 A	21	7,5 V	7,10 A	1,05 V	0,147 Ω	
50		29		10,0	1,45	0,145	0,145 Ω
84		49		16,8	2,15	0,145	

En admettant qu'en marche continue la température s'élève de 60°, les résistances deviennent 0,86 ohm et 0,18 ohm.

Dans le cas d'un transformateur de plusieurs dizaines de kilovolts-ampères, la résistance de l'enroulement basse tension est en général de l'ordre d'un centième d'ohm. Pour la mesurer, on la compare à celle d'un shunt d'ampèremètre.

2. — L'essai à secondaire ouvert consiste dans l'aimantation alternative de la carcasse du transformateur.

Nous nous proposons de mesurer en même temps que le courant I_1 dans le primaire :

1° la tension U_2 aux bornes du secondaire qui ne débite pas de courant,

2° la tension U_1 aux bornes du primaire,

3° la puissance P_1 absorbée par le transformateur.

Nous utilisons comme source de courant deux des bornes de phases du réseau triphasé entre lesquelles la tension est 210 volts; un rhéostat très résistant permet de régler le courant de 0,1 à 2 ampères.

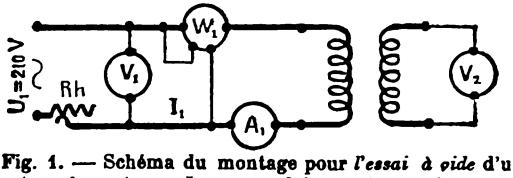


Fig. 1. — Schéma du montage pour *l'essai à vide* d'un transformateur. Le secondaire est pratiquement ouvert, car le voltmètre V_2 est très résistant. On fait croître I_1 et l'on mesure U_1, W_1 et U_2.

Pour que l'intensité dans le secondaire soit négligeable, nous employons un voltmètre très résistant pour mesurer U_2.

L'intensité I_1 est faible, l'ampèremètre qui la mesure est monté en aval des autres instruments.

La puissance P_1 aussi est faible, elle est mesurée avec un wattmètre pour faibles intensités avec plusieurs bornes de tension.

La figure 1 est le schéma de montage des appareils.

Les résultats des mesures sont consignés dans le tableau suivant :

TRANSFORMATEUR N°... — ESSAI A SECONDAIRE OUVERT

I_1 (1)	U_1 (2)	P_1 (3)	U_2 (4)
0,1 A	20 V		7,3 V
0,15	40	2 W	13,3
0,19	59,5	3	19,8
0,25	80	4,6	26,3
0,31	99	7	33
0,41	119	9,5	39
0,65	147	16	49
0,86	161	21	53,6
1,25	176	32,5	58,6
1,95	200	59	69

3. — L'essai direct en charge d'un transformateur n'est pas toujours possible.

Il exige que l'on dispose d'une puissance égale à la puissance nominale du transformateur, et les transformateurs industriels sont souvent très puissants; de plus, l'essai doit être fait non seulement pour des charges non inductives, mais aussi pour des charges inductives et différentes valeurs du déphasage. Il est moins coûteux, plus rapide et plus commode de recourir à une méthode indirecte, dite de Kapp, où l'on utilise des mesures faites à puissance réduite. Nous l'emploierons dans la manipulation qui suit.

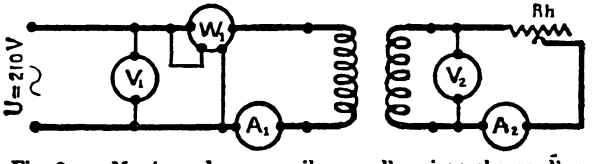


Fig. 2. — Montage des appareils pour l'essai en charge d'un transformateur débitant dans un rhéostat.
On fait varier I_2 et l'on mesure V_2, I_1 et W_1.

a) Le transformateur que nous étudions est petit : il est facile de lui faire débiter sa pleine charge dans un rhéostat métallique, *le facteur de puissance du récepteur est alors très voisin de* 1.

Le montage des appareils est donné par la figure 2. Les mesures faites ont été les suivantes :

TRANSFORMATEUR N°... — ESSAI DIRECT EN CHARGE

U_1 1	I_1 2	P_1 3	U_2 4	I_2 5
205 V	1,9 A	59 W	68,0 V	0 A
205	2,5	332	66,75	3,6
206	2,7	400	66,25	5,0
203	2,95	480	65,75	6,2
203	3,42	594	65	7,8
203	4,4	800	64,25	11,0
203	6,7	1 295	62,25	18,2
203	9,4	1 810	60	26,0

b) On constituerait un récepteur inductif en mettant en parallèle, avec le rhéostat, une ou plusieurs bobines de self réglables[1]. Mais le réglage d'un tel récepteur est long : c'est pourquoi nous n'essayerons pas le transformateur sur circuit inductif.

1. Voir plus loin une note sur la construction de telles bobines.

4. — Ces différents essais fournissent :

1° La valeur du rapport de transformation.

Le *rapport de transformation théorique* est le rapport du nombre de spires de l'enroulement secondaire au nombre de spires de l'enroulement primaire, c'est :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{200}{600} = 0{,}33$$

Le *rapport de transformation à vide* est le rapport de la tension secondaire à vide à la tension primaire

$$\frac{U_2}{U} = \frac{68}{205} \simeq 0{,}33.$$

Le *rapport de transformation en charge* est le rapport des tensions aux bornes du secondaire et du primaire, à *pleine charge :*

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{62}{203} = 0{,}306$$

Nous constatons que le rapport de transformation théorique et le rapport de transformation à vide sont à peu près égaux. Le rapport de transformation en charge est plus faible, il décroît quand la charge augmente.

2° La courbe d'aimantation du transformateur.

C'est la courbe des valeurs de la tension secondaire à circuit ouvert en fonction du courant primaire (fig. 3). Elle ressemble à la caractéristique à vide d'une dynamo.

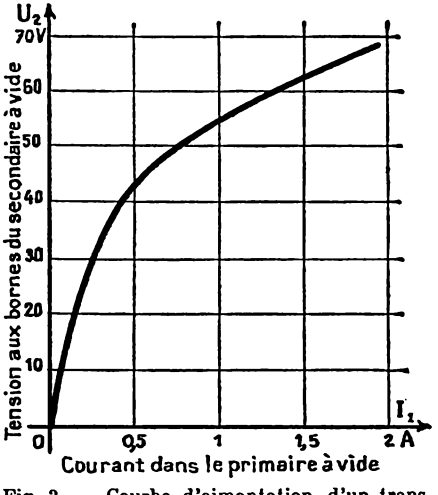


Fig. 3. — Courbe d'aimantation d'un transformateur. Le secondaire est ouvert. La tension aux bornes du secondaire croît quand le courant croît dans le primaire.

3° Les pertes à vide dans le fer.

La puissance P_1 fournie au transformateur dont le secondaire est ouvert est dissipée entièrement dans l'appareil. Elle comprend les pertes en chaleur Joule, $r_1 I_1^2$, dans l'enroulement primaire et la puissance perdue dans le fer à cause de l'hystérésis et des courants de Foucault. La résistance du circuit primaire est faible, l'intensité à vide est faible et nous pouvons admettre avec une approximation raisonnable que W_1 mesure les pertes dans le fer.

La figure 4 est la courbe des valeurs de ces pertes en fonction de U_1, tension aux bornes du primaire. Rappelons que les pertes dans le fer sont les mêmes en charge qu'à vide, puisqu'un transformateur fonctionne à flux constant.

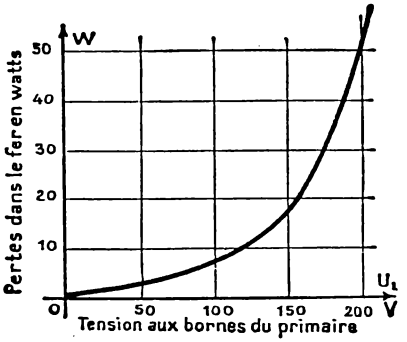


Fig. 4. — Pertes dans le fer du transformateur essayé.

4° La chute de tension en charge.

Les valeurs de la tension aux bornes du secondaire, en fonction du courant débité dans un circuit non inductif, sont représentées par la figure 5.

Cette tension, qui est de 68 volts à vide, diminue jusqu'à 62 volts quand le transformateur débite sa charge normale (1 200 watts). La chute de tension est 6 volts, soit $6 \times 100 : 68 = 9$ pour 100. Pour des transformateurs alimentant des circuits d'éclairage, elle ne doit pas dépasser 5 pour cent.

5° Le rendement.

C'est le rapport de la puissance débitée par le secondaire à la puissance fournie au primaire.

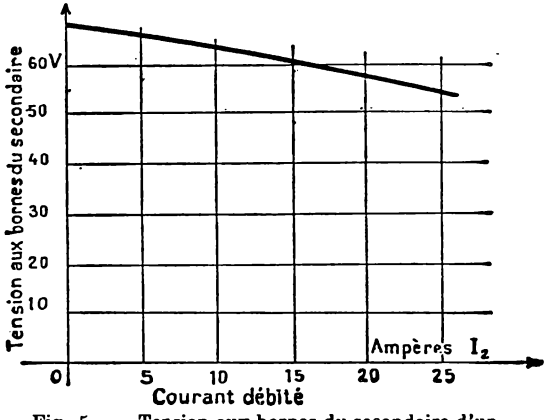


Fig. 5. — Tension aux bornes du secondaire d'un transformateur qui débite dans un rhéostat, c'est-à-dire dans un circuit non inductif.

Avec les mesures effectuées (secondaire débitant dans un récepteur non inductif), nous obtenons les résultats suivants [1] :

TRANSFORMATEUR N°... — RENDEMENT A DIVERSES CHARGES

P_1	U_2	I_2	$P_2 = U_2 I_2$	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$
1	2	3	4	5
59 W	68 V	0 A	0 W	0
332	66,75	3,6	240	0,73
400	66,25	5,0	331	0,83
480	65,75	6,2	407	0,85
594	65	7,8	508	0,86
800	64,25	11,0	710	0,89
1 295	62,25	18,2	1 130	0,88
1 810	60	26,0	1 560	0,87

La figure 6 représente la courbe de ce rendement en fonction de la

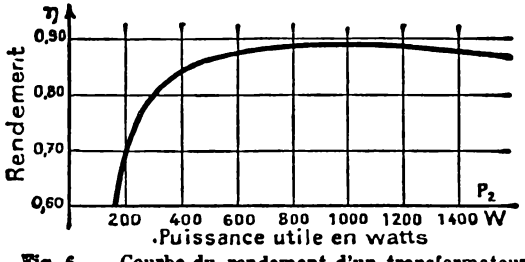


Fig. 6. — Courbe du rendement d'un transformateur en fonction de la puissance utile.

puissance utile. Si le récepteur était inductif, le rendement serait différent et plus faible.

Cette méthode directe de mesure du rendement n'est pas employée quand on n'effectue pas l'essai en charge.

1. Pour obtenir le rendement à chaud, il aurait fallu faire fonctionner le transformateur à pleine charge pendant au moins deux heures afin qu'il atteigne sa température de régime.

Transformateur monophasé. Essai en court-circuit. Diagramme de Kapp. — Rendement.

1. — L'essai en court-circuit d'un transformateur n'exige qu'une puissance réduite[1].

Il a pour but de déterminer la tension primaire, U_c, nécessaire pour obtenir l'intensité normale, I_2, dans le secondaire fermé sur lui-même.

On choisit pour primaire l'enroulement dont la tension normale est de l'ordre de celle dont on dispose dans la salle d'essais. On place sur le primaire un voltmètre, un ampèremètre, un wattmètre et un dispositif de réglage de la tension. Le secondaire est branché sur un ampèremètre à faible impédance qui le met pratiquement en court-circuit (fig. 1).

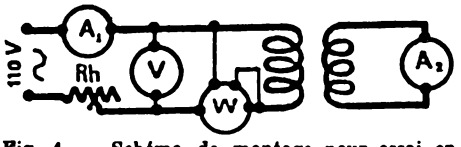


Fig. 1. — Schéma de montage pour essai en court-circuit d'un transformateur.

On applique au primaire, à la fréquence normale, une tension U_1, d'abord faible, que l'on fait croître lentement jusqu'à obtenir dans le secondaire l'intensité normale de pleine charge I_2. Pour différentes valeurs de l'intensité secondaire, on note les valeurs correspondantes du courant, de la tension et de la puissance primaires.

La tension primaire U_c qui produit dans le secondaire en court-circuit l'intensité de pleine charge I_2 se nomme la *tension de court-circuit* du transformateur.

On verra plus loin que le transformateur consomme peu en court-circuit; il est donc possible de faire l'essai avec une faible puissance et une tension peu élevée.

Pour essayer en court-circuit le petit transformateur de 1 200 VA,

1. Industriellement on n'essaie pas les petits transformateurs en court-circuit pour tracer le diagramme de Kapp. La méthode sert pour les transformateurs puissants qu'il serait coûteux et difficile d'essayer directement à pleine charge.

200-65 volts qui a été l'objet de la manipulation précédente, nous l'alimentons, du côté de la tension la plus élevée, avec le réseau à 50 périodes par seconde et 110 volts (50 V suffiraient), en plaçant en série avec lui un rhéostat de réglage pouvant aller à 50 ohms et supporter 10 ampères. Nous montons du côté primaire un voltmètre de calibre 50 volts, un ampèremètre pour 10 ampères et un wattmètre; du côté secondaire un ampèremètre de calibre 30 ampères.

Une précaution doit être prise : *ne pas couper le circuit secondaire pendant l'essai*, car le transformateur, fonctionnant alors à vide, absorberait un courant plus faible au primaire, la chute de tension produite par le rhéostat diminuerait et la d. d. p. aux bornes du voltmètre monté sur le primaire augmenterait et pourrait détériorer l'appareil de mesure.

Les résultats obtenus sont les suivants :

TRANSFORMATEUR N°... — ESSAIS EN COURT-CIRCUIT

N° de l'essai	I_1	U_1	P	I_2
1	4,10 A	21,6 V	21,5 W	12 A
2	6,85	36	90	20
3	9,60	50	180	28

La courbe des valeurs de U_1 en fonction de I_2 est à peu près une droite; il en est de même de la courbe de I_1 (fig. 2).

La tension de court-circuit du transformateur est U_c = 36 volts pour I_2 = 20 ampères.

2. — Dans la suite de l'étude, on considérera un transformateur équivalent au transformateur essayé et dont le rapport de transformation est égal à l'unité.

Pour obtenir ce transformateur équivalent, il suffit de supposer que l'on modifie le couplage des spires de l'un des enroulements.

Par exemple, le transfor-

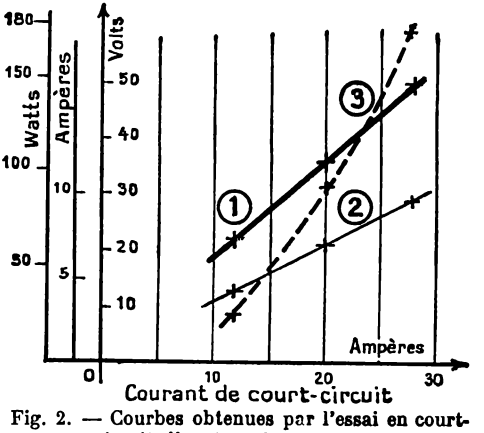


Fig. 2. — Courbes obtenues par l'essai en court-circuit d'un transformateur :
1. tension appliquée au primaire;
2. intensité absorbée par le primaire;
3. puissance absorbée par le primaire.

mateur que nous étudions a $n_1 = 600$ spires au primaire, $n_2 = 200$ spires au secondaire, son rapport de transformation est $m = n_1 : n_2 = 3$. Imaginons que l'on divise l'enroulement primaire en $m = 3$ bobines de chacune 200 spires et qu'on couple ces bobines en parallèle : le rapport de transformation devient 1. En conservant le courant normal I_1 dans chaque spire du nouveau primaire, le flux magnétique garde la même valeur dans la carcasse, les pertes de toute nature ne sont pas modifiées.

La résistance du primaire était r_1; divisée en m parties égales que l'on couple en parallèle, elle devient $r_1 : m^2$.

Pour maintenir dans chaque spire primaire le courant I_1, il suffit d'une tension primaire $U_1 : m$ à peu près égale à U_2.

Pour e transformateur équivalent au transformateur étudié, la tension de court-circuit devient $U'_c = 36 : 3 = 12$ volts.

3. — Interprétons l'essai en court-circuit qui a donné $U_c = 36$ volts pour $I_2 = 20$ ampères.

Puisque le secondaire est en court-circuit, la tension aux bornes y est nulle. La f. é. m. qui produit seulement le courant I_2 dans cet enroulement est faible, le flux magnétique commun aux deux enroulements qui engendre cette f. é. m. est peu important, de l'ordre, par exemple, du dixième de la valeur du flux en fonctionnement normal. Les pertes magnétiques, qui sont à peu près proportionnelles au carré de l'induction, n'atteignent plus que le centième des pertes magnétiques normales; elles sont négligeables.

Il en résulte que la puissance active absorbée au primaire est dissipée presque entièrement en chaleur Joule dans les enroulements primaire et secondaire :

$$P_a = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2,$$

soit en appliquant la relation

$$n_1 I_1 = n_2 I_2 \quad \text{ou} \quad I_1 = I_2 : m, \quad P_a = (r_1 : m^2 + r_2) I_2^2.$$

La *tension active* qui correspond à cette puissance est

$$U_a = P_a : I_2 = \left(\frac{r_1}{m^2} + r_2\right) I_2$$

Cette tension est inférieure à la tension de court-circuit U'_c.

Par exemple, pour le transformateur étudié, $r_1 = 0{,}69\ \Omega$ et $r_2 = 0{,}145\ \Omega$, d'où

$$U_a = (0{,}69 : 3^2 + 0{,}145) \times 20 = 4{,}5 \text{ volts},$$

alors que $\overrightarrow{U'_c} = 12$ volts.

C'est donc que la tension $\overrightarrow{U'_c}$ est la somme géométrique de la tension active $\overrightarrow{U_a}$ et d'une tension réactive $\overrightarrow{U_r}$ qui n'a pas été mesurée directement.

D'où provient cette tension réactive? Elle est due aux flux de fuite : flux de fuite primaire et flux de fuite secondaire.

Quand des courants passent simultanément dans les deux enroule-

ments, ils produisent un flux magnétique dans le circuit magnétique commun constitué pratiquement par le fer du transformateur. En plus, chaque enroulement produit un flux qui ne traverse pas l'autre : ce sont des flux de fuite. Parce qu'ils passent surtout dans l'air, ils sont *proportionnels aux courants qui les produisent.* Il en est de même des chutes de tension réactive qui en résultent. La chute de tension réactive totale peut donc s'écrire $U_r = l\omega I_2$.

Les tensions $\overrightarrow{U_a}$ et $\overrightarrow{U_r}$ sont en quadrature et la tension de court-circuit $\overrightarrow{U'_c}$ est leur résultante. Puisque $\overrightarrow{U'_c}$ et $\overrightarrow{U_a}$ ont été déterminées, le triangle rectangle ABC, dans lequel AB $= \overrightarrow{U_a}$ et AC $= \overrightarrow{U'_c}$, peut être construit. On lui donne le nom de ***triangle de Kapp*** (fig. 3).

Remarquons :

1° que les trois côtés du triangle de Kapp sont proportionnels à I_2;

2° qu'en divisant U_a, U_r et U'_c par I_2, ce qui revient à changer l'échelle de construction du triangle, $U_a : I_2 = (r_1 : m^2 + r_2)$ est une résistance, $Ur : I_2 = l\omega$, une réactance, $U'_c : I_2 = z$ est une impédance. On peut dire que z est *l'impédance intérieure totale* du transformateur équivalent au transformateur réel dans les conditions de l'essai en court-circuit.

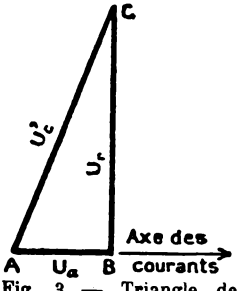


Fig. 3. — Triangle de Kapp. Les côtés sont proportionnels à I_2.

4. — A partir du triangle de Kapp, on trace le diagramme de Kapp du transformateur quand son secondaire débite dans un circuit extérieur.

On admet que *l'impédance intérieure totale* du transformateur équivalent ne change pas quand le transformateur débite dans un circuit extérieur de facteur de puissance quelconque; on admet aussi que cette impédance ne varie pas quand le courant dans le secondaire diffère de I_2.

Donc, si :

$\overrightarrow{U_2}$ est la tension aux bornes du secondaire débitant un courant I_2,

$\overrightarrow{U'_1}$ la tension appliquée aux bornes du *transformateur équivalent*,

$\overrightarrow{U_z}$ la chute de tension $z\,I_2$,

la tension $\overrightarrow{U'_1}$ est la résultante de $\overrightarrow{U_2}$ et de $\overrightarrow{U_z}$:

$$\overrightarrow{U'_1} = \overrightarrow{U_2} + \overrightarrow{U_z}$$

Le triangle construit avec ces trois vecteurs constitue le ***diagramme de Kapp*** (fig. 4).

5. — Le diagramme de Kapp sert à déterminer la caractéristique en charge $U_2 = f(I_2)$ pour U_1 constant.

Pour nous placer dans les mêmes conditions que pour l'essai en charge fait dans la manipulation précédente, soit la tension aux bornes du primaire, U_1 égale à 205 volts. Aux bornes du primaire du transformateur équivalent, elle serait $U'_1 = 205 : 3 = 68{,}3$ volts. C'est à peu près la tension aux bornes du secondaire à vide qui est égale à la f. é. m. dans le secondaire E_2.

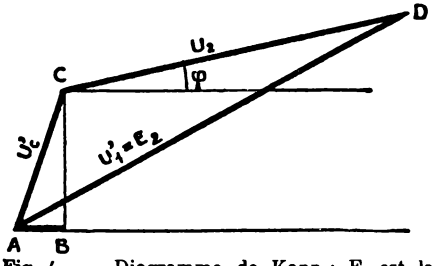


Fig. 4. — Diagramme de Kapp : E_2 est la résultante de U'_c et de U_2. E_2 est connue en grandeur, U'_c en grandeur et position, U_2 en direction. On peut construire le triangle ADC et obtenir la longueur de CD.

Construisons le triangle de Kapp (fig. 4), pour $I_2 = 20$ ampères. Nous savons que $\overrightarrow{AB} = 4{,}5$ volts et $\overrightarrow{AC} = 36 : 3 = 12$ volts. $\overrightarrow{AD}$ représente $U'_1 = E_2$ et le point D se trouve sur la circonférence de centre A et de rayon 68,3.

1° Cas où le circuit extérieur n'est pas inductif. — Pour $I_2 = 20$ ampères, l'origine du vecteur représentant la tension U_2, qu'il s'agit de déterminer, aux bornes du secondaire, est en C. Parce que cette tension est en phase avec le courant I_2, le vecteur qui la représente est parallèle à AB. L'extrémité D en est sur la circonférence de centre A précédemment tracée. Le vecteur $\overrightarrow{CD}$, à l'échelle du diagramme, représente 62,5 volts. Donc U_2, pour un débit de 20 ampères dans un circuit non

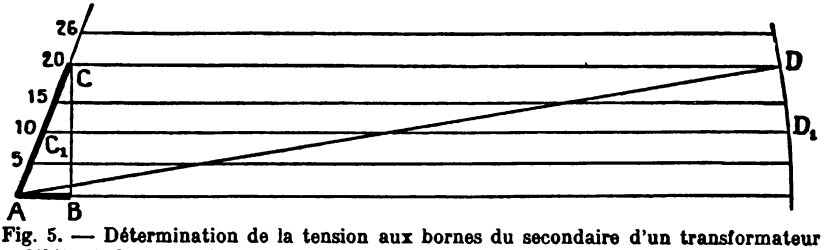


Fig. 5. — Détermination de la tension aux bornes du secondaire d'un transformateur débitant dans un circuit non inductif avec un diagramme de Kapp. AB = 4,5 V AC = 12 V, AD = 68,3 V.

inductif, égale 62,5 volts et la chute de tension est $E_2 - U_2 = 5,8$ volts (fig. 5).

Nous pouvons obtenir, avec le diagramme, la valeur de la tension aux bornes pour d'autres débits. Nous savons que les côtés du triangle de Kapp sont proportionnels à I_2; pour $I_2 = 10$ ampères, par exemple, le point C vient en C_1, le point D est D_1, la tension aux bornes est $C_1D_1 = 66$ volts.

Nous obtenons ainsi pour différents débits les valeurs suivantes :

I_2	0	5	10	15	20	26	ampères
U_2	68,3	67	66	64,5	62,5	60,75	volts

La caractéristique en charge tracée avec ces nombres diffère très peu

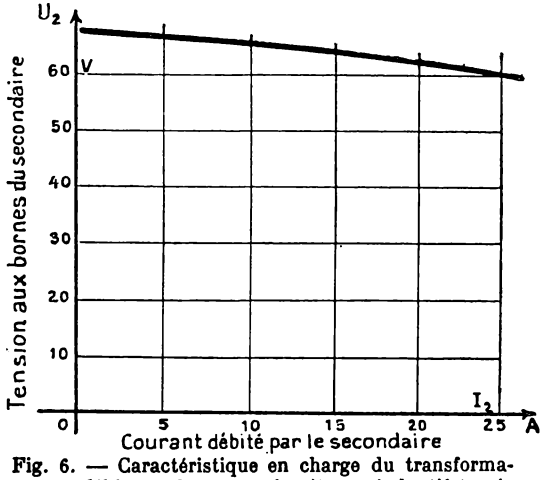


Fig. 6. — Caractéristique en charge du transformateur débitant dans un circuit non inductif tracée avec les valeurs tirées du diagramme de la figure 5.

de celle que nous avons obtenue par essai direct dans la manipulation précédente (fig. 6).

2° Cas où le circuit extérieur est inductif. — Quand le courant débité en $I_2 = 20$ ampères, l'origine du vecteur représentant $\overrightarrow{U_2}$ est en C. Ce vecteur fait avec CD un angle φ égal au déphasage de la tension sur le courant (fig. 7). La tension U_2 est représentée par le vecteur $\overrightarrow{CD'}$.

Pour le même déphasage et une autre intensité I'_2 (10 A, par exemple) nous déterminons l'origine C' du vecteur représentatif en faisant

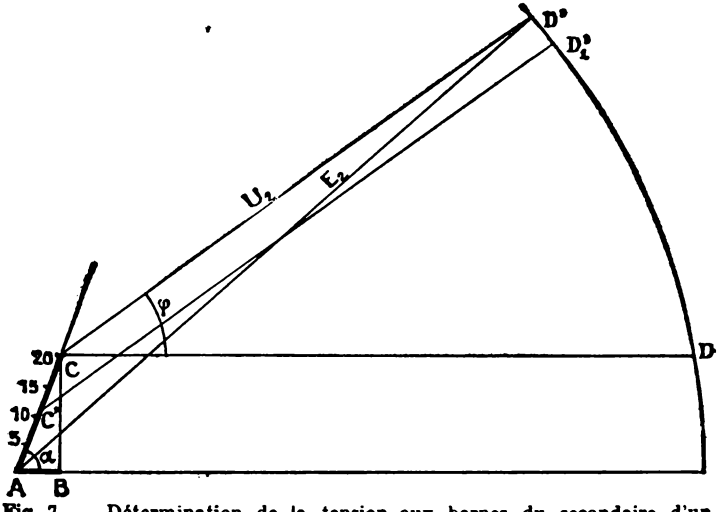


Fig. 7. — Détermination de la tension aux bornes du secondaire d'un transformateur débitant dans un circuit inductif avec un diagramme de Kapp. AB = 4,5 V, AC = 12 V, AD' = 68,3 V, cos φ = 0,80.

$\frac{AC'}{AC} = \frac{10'}{20}$, nous traçons la parallèle C'D'$_1$ à CD' et nous en mesurons la longueur.

Les résultats suivants ont été obtenus pour cos φ = 0,80.

I_2	0	5	10	15	20	26	ampères
U_2	68,3	66	63,4	60,8	57,5	54,5	volts.

Remarquons que la chute de tension est plus rapide que dans le cas où le circuit n'est pas inductif (fig. 8).

Nous pourrions aussi déterminer les variations de U_2 dans le cas d'un débit constant I_2, mais à cos φ décroissant. Le maximum de chute de tension se produit quand φ = α ; en l'espèce, pour I_2 = 20 ampères et φ ≃ 69°, il atteint 12 volts.

Les résultats obtenus en employant le diagramme de Kapp ne sont qu'approchés, parce que les hypothèses faites pour établir le triangle

fondamental ne sont pas tout à fait conformes à la réalité. En particulier, a relation $n_1 I_1 = n_2 I_2$, qui suppose négligeable le courant magnétisant, n'est suffisamment approchée que pour les transformateurs puissants et à pleine charge. Il en résulte que le diagramme de Kapp ne convient pas pour l'étude des petits transformateurs ou des transformateurs à faible charge. Mais il est couramment utilisé pour les gros transformateurs dont l'essai à pleine charge est rarement possible.

Remarquons la grande ressemblance entre le diagramme de Kapp et celui de Behn-Eschenburg pour les alternateurs.

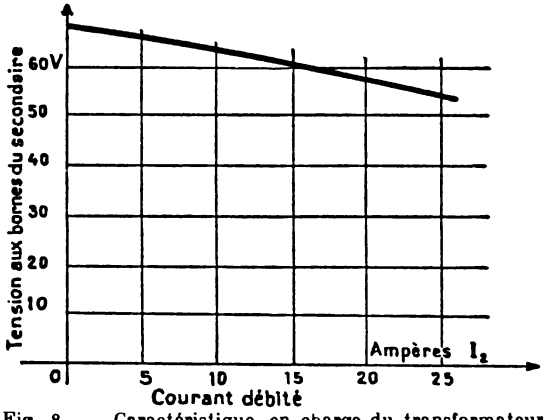


Fig. 8. — Caractéristique en charge du transformateur débitant dans un circuit dont le cos φ est 0,80 tracée avec le diagramme de la figure 7.

6. — Calcul du rendement d'un transformateur par la méthode des pertes séparées.

Soit à déterminer le rendement du transformateur essayé quand il débite 26 *ampères sous la tension de* 54,5 *volts dans un récepteur dont le facteur de puissance est cos* φ = 0,80.

La puissance active fournie par le transformateur est

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi = 26 \times 54{,}5 \times 0{,}80 = 1\,134 \text{ watts.}$$

La puissance P_1 qu'il absorbe se calcule en ajoutant les pertes p à la puissance débitée P_2, soit : $P_1 = P_2 + p$. Ces pertes comprennent la puissance perdue par effet Joule dans les enroulements p_c et la puissance p_f, perdue dans le fer par hystérésis et courants de Foucault.

On détermine p_c soit en utilisant la formule établie précédemment $p_c = (r_1 : m^2 + r_2)\, I_2^2$, soit en la mesurant au wattmètre dans l'essai en court-circuit[1]. Pour le transformateur essayé :

$p_c = (0{,}69 : 9 + 0{,}145) \times 26^2 = 150$ watts.

1. La mesure au wattmètre a l'avantage d'évaluer, avec les pertes Joule, les pertes dues aux courants de Foucault qui se produisent dans le cuivre des enroulements quand les conducteurs y sont de forte section.

Les pertes magnétiques ont été obtenues dans l'essai à vide en fonction de la tension aux bornes du primaire du transformateur. La caractéristique en charge tirée du diagramme de Kapp montre que la tension secondaire à vide correspondant à 54,5 volts en charge est 68,3 volts, soit au primaire 68,3 × 3 = 205 volts. D'après la figure 4 de la manipulation précédente p_f = 56 watts pour cette tension.

Donc $P_1 = 1\,134 + 150 + 56 = 1\,340$ watts

et $\eta = P_2 : P_1 = 1134 : 1340 = 0,846$.

Calcul approximatif d'une bobine de self réglable à noyau droit.

Nous nous proposons de déterminer les dimensions d'une bobine de self, dont le noyau vertical est déplaçable, telle qu'à son maximum d'inductance elle soit traversée par une intensité de 20 ampères sous 110 volts à ses bornes. La fréquence du courant est 50 périodes par seconde et nous admettons que l'induction maximum dans le fer atteint 10 000 gauss.

Le calcul est analogue à celui d'un transformateur [1], mais beaucoup moins précis.

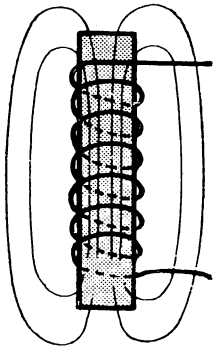


Fig. 1. — Le circuit magnétique d'une bobine à noyau droit est mal déterminé parce que les lignes d'induction se ferment dans l'air.

Circuit magnétique.

Le noyau est feuilleté, à section carrée.

Le flux produit par la bobine sort par une face terminale du noyau et les régions voisines des quatre faces latérales, traverse l'air et rentre dans le noyau par l'autre extrémité du noyau, tant par le bout que par les faces latérales. La réluctance d'un tel circuit magnétique est fort difficile à calculer (fig. 1).

M. Boucherot a indiqué que la réluctance de la partie extérieure du circuit dépend peu de la longueur du noyau et qu'on peut admettre qu'elle égale celle d'un entrefer, dit *entrefer équivalent*, ayant même section que le noyau et une longueur de 8 à 10 millimètres. D'autres électriciens ont constaté expérimentalement que cette longueur de l'entrefer équivalent doit être fort augmentée quand la section du noyau est grande pour atteindre, par exemple, 4 centimètres pour une section de 300 centimètres carrés. Cette incertitude au début du calcul fait que les résultats que l'on obtient ne sont qu'approximatifs.

1. *Electricité industrielle. Machines électriques* : note fin 22e leçon.

La bobine que nous calculons est petite, l'entrefer équivalent peut être supposé de 8 millimètres. La réluctance du noyau est négligeable devant celle de l'entrefer et nous n'en tiendrons pas compte.

Nombre de spires de la bobine.

Pour produire B gauss dans un entrefer de l centimètres, 0,8 $B\,l$ ampères-tours sont nécessaires. Pour obtenir 10 000 gauss dans un entrefer de 0,8 centimètre, il faut :

$$0{,}8 \times 10\,000 \times 0{,}8 = 6\,400 \text{ ampères-tours.}$$

L'intensité efficace du courant est 20 ampères; si ce courant est sinusoïdal, son intensité maximum est $20\sqrt{2}$ ampères.

Désignons par n le nombre de spires de l'enroulement, le nombre d'ampères-tours quand le courant passe par son maximum est $20.\sqrt{2}.\,n$. Donc :

$$20.\sqrt{2}.\,n = 6\,400 \quad \text{et} \quad n = 6\,400 : 28 \simeq 228 \text{ spires.}$$

Section du noyau.

Rappelons la règle de Boucherot : *Quand la section du noyau d'une bobine est* 100 *centimètres carrés, l'induction* 10 000 *gauss, la fréquence* 50 *périodes par seconde, il faut* 50 *spires pour obtenir une f. c. é. m. de* 110 *volts*, en d'autres termes, la f. c. é. m. par spire est 2,22 volts.

Avec une section de noyau s centimètres carrés, une induction maximum B gauss, une fréquence f périodes par seconde, une bobine de n spires donne une f. c. é. m. :

$$E = 2{,}22 \times \frac{B}{10\,000} \times \frac{s}{100} \times \frac{f}{50} \times n.$$

Donc pour une induction de 10 000 gauss et une fréquence de 50 périodes par seconde :

$$E = 2{,}22 \times n \times \frac{s}{100}$$

L'équation

$$110 = 2{,}22 \times 228 \times \frac{s}{100}$$

donne

$$s \simeq 22 \text{ cm}^2.$$

En tenant compte de l'isolant entre les tôles, cette section doit être portée à

$$22 : 0{,}9 = 25 \text{ cm}^2.$$

Le noyau carré a donc 50 millimètres de côté.

Calcul de l'enroulement.

Pour supporter 20 ampères sans échauffement excessif, on utilise 2 fils de cuivre en parallèle de 2 millimètres de diamètre. La section de l'ensemble est 6,28 millimètres carrés et la densité du courant atteint 3,2 ampères par millimètre carré.

Dimensions de la bobine.

L'enroulement est réparti en 6 couches de 38 spires.

Chaque fil émaillé et couvert d'une couche de coton a un diamètre extérieur de 2,5 millimètres. Une spire de deux fils en parallèle à côté l'un de l'autre occupe 5 millimètres, la longueur du bobinage est $5 \times 38 = 190$ millimètres et l'épaisseur des 6 couches $2{,}5 \times 6 = 15$ millimètres.

Le noyau feuilleté mesure 250 millimètres de longueur.

La carcasse de la bobine peut être fabriquée en contre-plaqué épais de 5 millimètres laissant un trou de 54 × 54 millimètres pour le passage facile du noyau. On lui donne 300 millimètres de longueur afin de guider le noyau pendant tout son déplacement. Les joues, épaisses de 20 millimètres, sont larges de 30 et de 80 millimètres (fig. 2 et 3).

Longueur, poids et résistance du fil enroulé.

Une spire moyenne a la forme d'un carré de 64 + 15 ≃ 80 millimètres de côté. Sa longueur est 80 × 4 = 320 millimètres. La longueur totale d'un fil enroulé est :

$$0{,}320 \times 228 = 73 \text{ mètres.}$$

1 mètre de fil de cuivre de 2 millimètres pèse environ 28 grammes. Il faut par bobine :

$$0{,}028 \times 73 \times 2 = 4 \text{ kilogrammes de fil.}$$

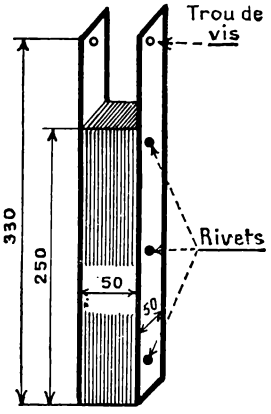


Fig. 2. — Noyau d'une bobine de self en tôles de 0,5 *mm* serrées par deux tôles de 2 *mm* prolongées pour la fixation du noyau sur une tringle de bois.

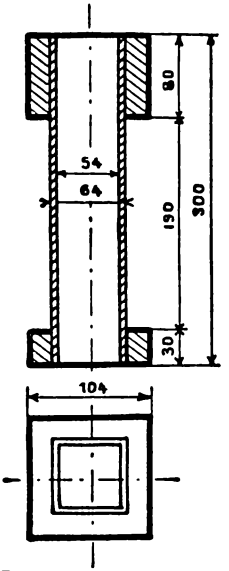


Fig. 3. — Croquis de la carcasse en bois d'une bobine de self.

La résistance du fil par mètre est 0,005 5 ohm, soit pour l'enroulement de deux fils en parallèle :

$$\frac{0{,}005 \times 73}{2} = 0{,}20 \text{ ohm.}$$

Refroidissement.

Négligeons les pertes dans le fer. La perte due à l'effet Joule atteint pour 20 ampères :

$$RI^2 = 0{,}2 \times 20^2 = 80 \text{ watts.}$$

La surface extérieure de l'enroulement par laquelle se fait surtout le refroidissement mesure :

$$9{,}5 \times 19 \times 4 = 720 \text{ centimètres carrés.}$$

En y ajoutant la surface intérieure

$$5{,}4 \times 19 \times 4 = 410 \text{ centimètres carrés}$$

on trouve que la surface totale de refroidissement est 1 130 centimètres carrés, soit 14 centimètres carrés par watt : c'est un peu faible; pour une bobine destinée à un

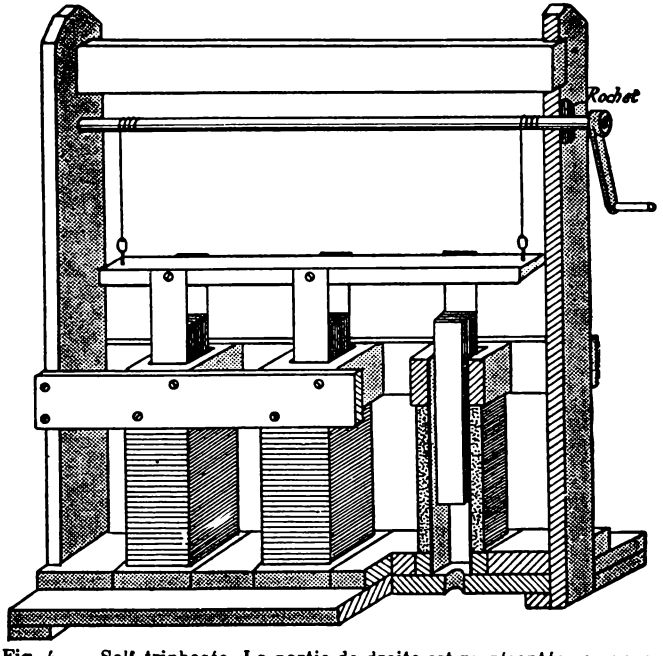


Fig. 4. — Self triphasée. La partie de droite est représentée en coupe.

service continu, 15 centimètres carrés de surface extérieure sont nécessaires; mais la bobine calculée destinée à des essais de machines ne fonctionne que pendant une heure au maximum.

On peut exécuter trois bobines identiques, les placer verticalement côte à côte, fixer les trois noyaux à une tringle de bois pour qu'un treuil les monte ou descende en même temps (fig. 4). L'ensemble sert à régler des courants triphasés sans les déséquilibrer.

Alternateur triphasé.

Les essais directs d'un alternateur triphasé de faible puissance sont analogues à ceux d'une génératrice de courant continu. On mesure la résistance des enroulements, on relève la caractéristique à vide comme s'il s'agissait d'une dynamo à excitation indépendante. Quand l'alternateur fonctionne en charge, il y a lieu de tenir compte du déphasage φ du courant sur la tension aux bornes. Pour une excitation déterminée et constante, il existe donc une infinité de caractéristiques en charge. La plus facile à obtenir est celle qui correspond à $\cos \varphi = 1$.

La détermination du rendement d'un alternateur par la méthode des pertes séparées est plus difficile que celle d'une dynamo, parce qu'il est moins commode de déterminer les pertes dans la machine à vide.

Nous nous proposons d'essayer un petit alternateur triphasé, à induit mobile, bipolaire, sans excitatrice.

Vous savez qu'un tel alternateur est construit comme une dynamo à courant continu. L'enroulement en tambour de l'induit est fermé sur lui-même. Trois points à 120° de cet enroulement sont réunis à trois bagues isolées montées sur l'arbre de l'induit. Le courant y est pris par trois frotteurs. L'alternateur est donc couplé en triangle par construction et ce couplage ne peut être changé.

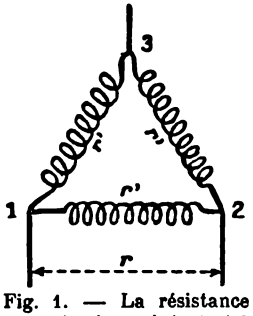


Fig. 1. — La résistance r entre les points 1 et 2 a pour valeur $\frac{2}{3} r'$.

La plaque signalétique de la machine porte les indications : ampères 10; volts 120; excitation 220 volts; tours 3 000 par minute.

1. — Mesurons les résistances des enroulements.

Inducteur. — Nous employons du courant continu 220 volts, un ampèremètre avec shunt de 1 ampère, un voltmètre de 300 volts, ces deux appareils à cadre mobile et aimant fixe, et un rhéostat de réglage d'une cinquantaine d'ohms.

La moyenne de trois mesures donne R = 415 ohms pour la résistance à froid.

Induit. — **La résistance à mesurer est la résistance entre bagues (fig. 1).**

Nous utilisons les appareils de mesure qui ont servi pour l'inducteur, mais avec un shunt de 10 ampères et le calibre 150 volts, du courant continu à 115 volts et un rhéostat de réglage 15 ohms, 10 ampères.

Nous avons trouvé entre les bagues 1 et 2, 1,15 ohm ; entre les bagues 1 et 3, 1,19 ohm ; entre les bagues 2 et 3, 1,27 ohm ; donc, en moyenne, $r = 1{,}20$ ohm, à froid.

Il n'est pas utile de calculer la résistance r', de l'une des phases de l'induit. Ce calcul est d'ailleurs facile et donne

$$r' = \frac{3}{2} r.$$

2. — Déterminons la caractéristique à vide.

C'est la courbe de la f. é. m. en fonction du courant d'excitation, l'alternateur tournant à vitesse constante.

L'alternateur est entraîné à 3 000 tours par minute (pour donner une fréquence de 50 périodes par seconde) par un moteur à courant continu dont la vitesse est ajustable au moyen d'un rhéostat de champ.

Une tension continue de 220 volts est appliquée à l'inducteur. Le courant qu'elle produit est réglé avec un rhéostat de champ de grande résistance.

Un ampèremètre avec un shunt de 1 ampère est en série avec l'inducteur, un voltmètre à courant alternatif 0 — 15 — 75 — 150 volts est branché aux bornes de l'induit.

La figure 2 indique la disposition des appareils.

Trois opérateurs sont utiles : l'un règle et mesure la vitesse, le second règle et mesure l'excitation, le troisième lit la tension aux bornes de l'alternateur et note les lectures faites. Une première série de mesures est effectuée par valeurs croissantes de i, une seconde par valeurs décroissantes.

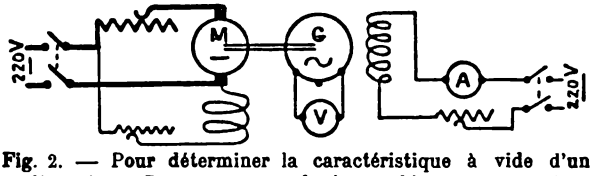


Fig. 2. — Pour déterminer la caractéristique à vide d'un alternateur G, on commande la machine par un moteur réglable M, à vitesse constante. On fait varier l'excitation de l'alternateur et l'on mesure sa f. é. m.

Nous avons obtenu les résultats suivants :

ALTERNATEUR TRIPHASÉ — CARACTÉRISTIQUE A VIDE

LECTURES				CALCULS		
Vitesse	Ampèrem. 100 div. shunt 1 A	Voltmètre Lectures	Voltmètre 150 div. Calibre	i	E'	E corrigée.
1	2	3	4	5	6	7
3 000	0	50	15	0 A	5,0 V	5 V
2 980	5,0	90,4	75	0,05	45,2	45,5
2 990	10	77	150	0,10	77	77,2
2 985	18	104		0,18	104	104,5
2 985	25	116		0,25	116	116,5
2 965	31	124		0,31	124	125,4
3 025	36	133		0,36	133	131,9
3 010	47	142		0,47	142	141,8
3 020	43	139		0,43	139	138,1
2 975	35	130		0,35	130	131,1
2 970	32	127		0,32	127	128,2
2 965	28	122		0,28	122	123,4
2 990	61	104		0,16	104	104,3
2 990	9	81		0,09	81	81,2
2 995	0	20		0	20	20

Nous ne sommes pas arrivés à régler rigoureusement la vitesse de l'alternateur à 3 000 tours par minute; nous corrigeons la tension lue en la multipliant par le rapport $\frac{3\,000}{N}$; puisque la f. é. m. produite est proportionnelle à la vitesse.

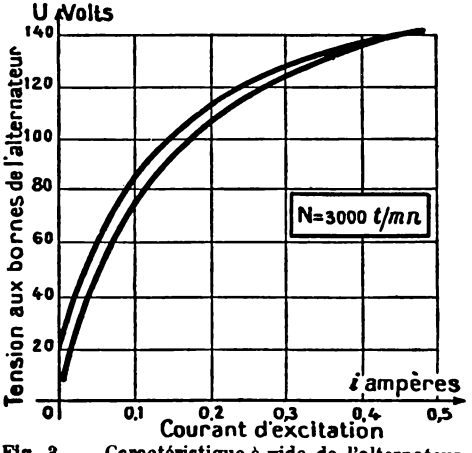


Fig. 3. — Caractéristique à vide de l'alternateur.

La figure 3 représente la caractéristique obtenue. La courbe présente deux branches, la branche qui correspond aux valeurs décroissantes de l'excitation est plus élevée que l'autre à cause de l'hystérésis du circuit inducteur.

La caractéristique a la même forme que celle d'une

génératrice à courant continu; la saturation magnétique n'est pas très marquée parce que l'entrefer ne se sature pas.

3. — Déterminons une caractéristique en charge.

C'est la courbe de la tension aux bornes de l'alternateur en fonction du courant débité dans un circuit récepteur à facteur de puissance constant, l'excitation restant constante ainsi que la vitesse.

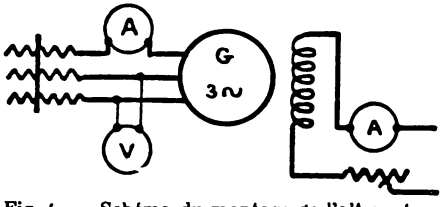


Fig. 4. — Schéma du montage de l'alternateur pour relever la caractéristique en charge.

Pour simplifier la manipulation, nous ferons débiter la machine dans un rhéostat de charge, le cos φ du récepteur est alors égal à l'unité. Il suffit d'ajouter au montage précédent un rhéostat de charge triphasé d'environ 40 ohms pouvant supporter 12 ampères. Un ampèremètre dans l'une des phases mesure le courant débité.

Les résultats obtenus sont les suivants :

ALTERNATEUR TRIPHASÉ — CARACTÉRISTIQUE EN CHARGE (cos φ = 1)

LECTURES			RÉSULTATS		
Ampèremètre 150 div. shunt 15 A	Voltmètre 150 div. calibre 150	Vitesse N	I	U	U corrigé
0	111	3 035	0 A	111 V	109,7 V
36,5	105	2 985	3,65	105	105,5
51	104	2 975	5,1	104	104,8
83	104	3 090	8,3	104	100,9
98	98	3 040	9,8	98	96,7
118	89	2 990	11,8	89	89,2

Pour tenir compte de la variation de la vitesse, nous avons multiplié la tension lue par le rapport 3 000 : N. Cette correction n'est qu'approximative.

La courbe de la figure 5 représente la caractéristique en charge.

4. — L'étude directe du fonctionnement en charge n'est possible que pour les alternateurs de faible puissance.

Pour essayer en charge de gros alternateurs par la méthode que nous venons

d'indiquer, il faudrait disposer d'une puissance électrique considérable, dépenser beaucoup d'énergie, construire spécialement des résistances et des bobines de self pour constituer des récepteurs appropriés. On préfère déduire les caractéristiques en charge d'autres courbes faciles à obtenir à peu de frais, telles que la caractéristique à vide, celle de court-circuit, celle à facteur de puissance nul, etc. La méthode de Behn-Eschenbourg, étudiée sommairement dans le cours d'électricité, est un exemple de procédé d'essai indirect; elle n'est pas employée en pratique parce qu'elle conduit à une chute de tension exagérée. La méthode industrielle est celle de Potier que nous n'étudierons pas parce qu'elle dépasse le niveau de notre programme.

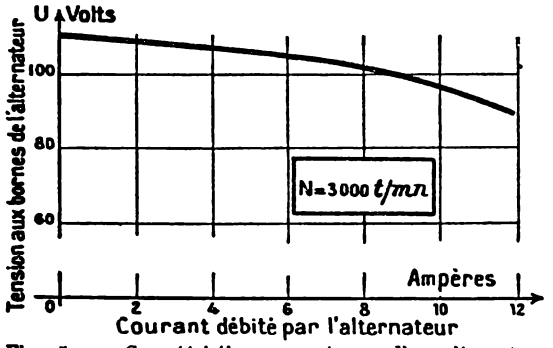


Fig. 5. — Caractéristique en charge d'un alternateur débitant dans un circuit non inductif. C'est la courbe de la tension aux bornes, $U = f(I)$, en fonction du courant débité, l'excitation et la vitesse restant constantes.

Rendement d'un alternateur.

5. — Rappelons le principe de la méthode des pertes séparées appliquée à un alternateur.

En désignant par P_u la puissance utile aux bornes de l'alternateur, par p la somme des pertes dans la machine, le rendement est

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}.$$

Les pertes comprennent :

1° la puissance employée à l'excitation p_e, que ce soit la puissance fournie par l'excitation séparée comme pour l'alternateur que nous essayons, ou la puissance de l'excitatrice incorporée à la machine;

2° les pertes considérées comme constantes p_c quand la f. é. m. de l'alternateur et sa vitesse sont invariables : ce sont les pertes magnétiques par hystérésis et courants de Foucault et les pertes mécaniques résultant des frottements;

3° les pertes p_v variables avec la charge dues à l'effet Joule dans l'induit auxquelles s'ajoutent dans les gros alternateurs des pertes supplémentaires produites par des courants de Foucault dans les conducteurs de l'induit et par la distorsion du flux dans le circuit magnétique.

6. — Mesure de la puissance employée à l'excitation.

Dans le cas où l'excitation est séparée, la puissance consommée s'évalue avec un ampèremètre dans le circuit inducteur et un voltmètre aux bornes de l'ensemble inducteur et rhéostat de champ. On tient compte ainsi des pertes dans le rhéostat de réglage.

S'il s'agit d'une excitatrice en bout d'arbre du rotor, elle a été essayée à part comme une génératrice ordinaire à courant continu; son rendement à toutes charges est connu. Connaissant sa tension aux bornes et l'intensité qu'elle débite, il est possible de déterminer la puissance qu'elle absorbe et qu'il faut compter comme perte.

7. — Mesure des pertes à vide.

L'une des méthodes employées est celle du moteur taré. Elle consiste à commander l'alternateur à vide à sa vitesse normale par un petit moteur à courant continu dont on possède la courbe du rendement en fonction de la charge. L'alternateur est *excité* pour donner une f. é. m. égale à celle qu'il produit en charge. Si le moteur absorbe la puissance p_m et que son rendement soit alors η, les pertes à vide atteignent

$$p_c = p_m \times \eta.$$

Cette détermination manque de précision. Vous remarquerez qu'elle comprend à tort dans p_c les pertes dues à la courroie de commande.

Par le même procédé, on peut mesurer les pertes mécaniques seules en entraînant l'alternateur *non excité* par le moteur taré. Cette séparation des pertes n'est pas utile pour le calcul du rendement.

8. — Calcul des pertes en chaleur Joule dans l'induit.

On se donne la puissance à débiter par l'alternateur, soit P watts et le facteur de puissance cos φ du circuit récepteur.

L'intensité I dans les fils de ligne est calculée en se servant de la relation

$$P = U\ I \sqrt{3} \cos \varphi.$$

En désignant par r ohms la résistance intérieure de l'induit mesurée entre bornes ou entre bagues, quel que soit le mode de couplage de l'alternateur, la perte par effet Joule est[1]

$$P_v = \frac{3}{2} r I^2.$$

9. — Application: rendement de l'alternateur étudié quand il débite 1 900 watts dans des lampes.

1. Nous laissons au lecteur le soin de démontrer cette formule : 1° pour le couplage en étoile, 2° pour le couplage en triangle.

La tension est 110 volts, le facteur de puissance du circuit récepteur est égal à 1. De

$$1\,900 = 110 \times I \times \sqrt{3}$$

nous tirons I = 10 ampères.

La caractéristique en charge montre que pour un débit de 10 ampères la chute de tension dans l'induit est environ de 9 volts, la f. é. m. en charge est donc voisine de 119 volts; pour la produire, d'après la caractéristique à vide, il faut un courant de 0,26 ampère. Puisque ce courant est fourni sous 220 volts, la puissance consommée pour l'excitation a pour valeur

$$p_c = 220 \times 0{,}26 = 57 \text{ watts.}$$

La résistance entre bagues de l'induit est 1,20 ohm à froid, soit 1,20 × 1,25 après échauffement de 60°; il se perd dans l'induit par effet Joule

$$p_v = \frac{3}{2} \times 1{,}20 \times 1{,}25 \times 10^2 = 225 \text{ watts.}$$

Pour mesurer les pertes à vide, l'alternateur a été entraîné à 3 000 tours par minute par le moteur à courant continu dont la courbe de rendement a été déterminée au cours de la 33e manipulation, puis excité pour donner 119 volts à ses bornes. Le moteur a absorbé 2,55 ampères sous 216 volts, soit 551 watts; son rendement est alors $\eta = 0{,}50$. L'alternateur consomme $551 \times 0{,}50 = 276$ watts correspondant aux pertes à vide.

En somme, le total des pertes est :

$$p = 57 + 225 + 276 = 558 \text{ watts,}$$

et le rendement de l'alternateur débitant 1 900 watts a pour valeur

$$\eta = \frac{1\,900}{1\,900 + 558} = 0{,}78.$$

Comparé à celui des gros alternateurs industriels qui atteint 0,96, ce rendement est faible.

Moteur synchrone triphasé.

Nous nous proposons de *démarrer* un moteur synchrone triphasé, de le *régler*, de *déterminer comment varie le courant qu'il absorbe*, à charge constante, en fonction de l'intensité du courant d'excitation.

1. — Un moteur synchrone est un alternateur qui fonctionne comme récepteur.

Nous utilisons le petit alternateur étudié dans la manipulation précédente. Ses spécifications sont :

110 volts entre phases,	10 ampères à pleine charge,
3 000 tours par minute,	excitation indépendante sous 220 volts.

On l'alimente par un alternateur triphasé fournissant toute tension comprise entre 0 et 200 volts à la fréquence de 50 périodes par seconde.

On le charge en lui faisant entraîner une génératrice shunt à courant continu qui débite dans un rhéostat de charge.

Cette dynamo fonctionnant en moteur avec le courant continu de l'installation sert à démarrer le moteur synchrone.

2. — Rappelons les conditions de démarrage d'un moteur synchrone.

Pour qu'un moteur synchrone puisse être *accroché* sur la ligne d'alimentation sans produire un à-coup important dans le courant absorbé, il faut :

1° qu'il soit en *concordance de phases* avec le courant qui doit l'alimenter;

2° qu'il y ait *synchronisme* entre la tension produite par l'alternateur avant couplage et celle du réseau, c'est-à-dire que les deux tensions aient la même fréquence;

3° que les deux tensions *soient à peu près égales*.

1° La vérification de la concordance des phases de l'alternateur et de la ligne d'alimentation est, en fait, une vérification du branchement de la machine. Elle n'est indispensable que lors de la première installation du moteur ou quand des modifications ont été apportées à cette installation.

Elle s'effectue avec trois lampes capables de supporter une tension double de celle de la ligne que l'on monte en dérivation sur les trois lames de l'interrupteur de couplage. Le branchement du moteur est bon quand les trois lampes s'allument et s'éteignent simultanément. Si l'on n'obtient pas ce résultat, il faut croiser deux des fils de connexion de l'alternateur à l'interrupteur [1].

2° Comme *indicateur de synchronisme*, on peut utiliser une seule des lampes de l'indicateur de concordance des phases. Une extinction prolongée de cette lampe indique que le synchronisme des tensions est réalisé. Remarquez que l'indicateur de concordance des phases vérifie aussi le synchronisme.

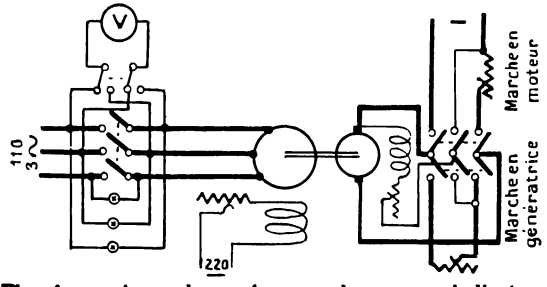


Fig. 1. — A gauche, moteur synchrone avec indicateur de concordance de phases et voltmètre pour le démarrage; à droite, dynamo servant à démarrer le moteur, puis à le charger.

3° Nous ajoutons un voltmètre avec un commutateur bipolaire à deux directions pour vérifier l'*égalité des tensions* de la ligne d'alimentation et du moteur synchrone à coupler.

Le moteur à courant continu qui entraîne le moteur synchrone pour le démarrage est muni d'un rhéostat de démarrage et d'un rhéostat de champ pour l'ajustage de la vitesse. Vous remarquerez qu'un moteur synchrone n'a pas de sens de rotation déterminé par construction : ce sens résulte des connexions avec la ligne d'alimentation.

Un commutateur bipolaire à deux directions monté sur la ligne à courant continu permet, quand le démarrage est effectué, de faire fonctionner la machine à courant continu en génératrice qui débite dans un rhéostat de champ.

La figure 1 est le schéma de montage des appareils. Un ampèremètre et un wattmètre sont montés dans la ligne d'alimentation du moteur synchrone, un ampèremètre est placé dans le circuit d'excitation (fig. 2).

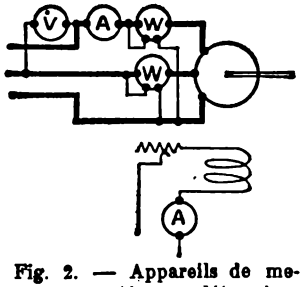


Fig. 2. — Appareils de mesure montés pour déterminer les courbes en V : en réalité on n'emploie qu'un wattmètre avec un commutateur.

1. *Électricité industrielle. Machines électriques :* 28e leçon.

3. — Exécutons les manœuvres de démarrage et de réglage du moteur synchrone.

1° Avec le moteur à courant continu, donnons à l'alternateur une vitesse voisine de la normale.

2° Excitons l'alternateur pour qu'il produise une f. é. m. de 110 volts.

3° En manœuvrant le rhéostat de champ du moteur à courant continu, ajustons avec précision la vitesse de l'alternateur pour obtenir une extinction prolongée des lampes de synchronisme, la vitesse de synchronisme est alors atteinte. Réglons à nouveau la f. é. m. à 110 volts. Quand les lampes sont éteintes, fermons l'interrupteur de couplage sur le réseau : le moteur synchrone est alors accroché.

4° Ouvrons le commutateur d'alimentation du moteur à courant continu : le moteur synchrone tourne à vide.

Pour le mettre en charge, nous enclenchons le commutateur de la dynamo sur le rhéostat d'absorption que nous réglons pour que le moteur synchrone prenne sur sa ligne d'alimentation l'intensité désirée, par exemple une dizaine d'ampères.

5° Régler le moteur synchrone consiste à l'exciter pour que sa marche soit stable. En modifiant l'excitation de ce moteur, sa vitesse ne change pas, sa charge non plus, puisque les conditions de marche de la génératrice à courant continu qui produit cette charge ne changent pas; pourtant l'intensité du courant qu'il absorbe augmente ou diminue parce que son facteur de puissance varie.

Il est possible de trouver par tâtonnements une position de la manette du rhéostat d'excitation pour laquelle le courant absorbé soit minimum. Souvent, pour cette valeur de l'excitation, le moteur synchrone n'est pas stable : il « pompe ». En augmentant légèrement l'excitation, cette instabilité disparaît : le réglage est effectué.

Pour arrêter le moteur, nous supprimons d'abord sa charge, puis nous ouvrons l'interrupteur de couplage sur le réseau.

4. — Déterminons des courbes en V du moteur synchrone.

Rappelons qu'une courbe en V d'un moteur synchrone [1] alimenté à fréquence constante sous tension constante U et travaillant à puissance constante P *est la courbe des valeurs du courant I absorbé par le moteur en fonction du courant d'excitation i.*

Il est facile de faire travailler un moteur synchrone à puissance constante quand il entraîne une dynamo. En effet, le moteur tourne à vitesse constante, la vitesse de synchronisme; si on ne modifie ni la résistance

1. *Électricité industrielle. Machines électriques :* 28e leçon.

de charge, ni l'excitation de la dynamo, la puissance qu'elle débite reste invariable et il en est de même de celle que lui fournit le moteur synchrone.

Le montage précédent convient pour le relevé d'une courbe en V. Il existe une infinité de ces courbes, chacune d'elles correspondant à une valeur déterminée de la puissance P. Nous en déterminerons quatre : la première à pleine charge, P = 2 000 watts; la seconde en surcharge, P = 4 000 watts; une troisième à demi-charge, P = 1 000 watts et la dernière à vide.

Nous placerons un double wattmètre sur la ligne d'alimentation du moteur pour chercher commodément comment varie le facteur de puissance de la machine en fonction du courant absorbé (fig. 2).

Rappelons que les deux wattmètres mesurent, l'un $P_1 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$, l'autre $P_2 = UI \cos\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$, les deux angles $\left(\frac{\pi}{6} - \varphi\right)$ et $\left(\frac{\pi}{6} + \varphi\right)$ étant inférieurs à π. Quand $P_1 = P_2$, c'est que $\frac{\pi}{6} - \varphi = \frac{\pi}{6} + \varphi$, d'où $\varphi = 0$: le courant I et la tension U sont en phase.

Les lectures faites ont donné les valeurs suivantes :

1° Moteur à pleine charge.

$P = 2\,000\ W \quad U = 110\ V \quad N = 3\,000\ t/mn.$

Courant d'excitation *i*	Courant absorbé I	WATTMÈTRE P_1	WATTMÈTRE P_2	cos φ (calculé)
0,095 A	13,9 A	500 W	1 500 W	0,756
0,12	12,5	650	1 385	0,850
0,155	11,1	800	1 200	0,944
0,18	10,54	950	1 050	0,996
0,195	10,5	1 000	1 000	1,000
0,247	11,45	1 250	750	0,917
0,345	16,2	1 675	325	0,650
0,450	22,6	2 100	— 100	0,466

2° Moteur en surcharge.

$P = 4\,000\ W \quad U = 110\ V \quad N = 3\,000\ t/mn.$

0,195	23,9	1 375	2 625	0,879
0,230	21,6	1 700	2 300	0,969
0,255	21,0	1 900	2 100	0,996
0,265	21,0	2 000	2 000	1,000
0,275	21,1	2 075	1 925	0,997
0,297	21,2	2 175	1 825	0,990
0,335	22,1	2 375	1 625	0,950
0,370	23,45	2 575	1 425	0,894
0,435	26,1	2 850	1 150	0,805

3° Moteur à demi-charge.

P = 1 000 *W* *U* = 110 *V* *N* = 3000 *t/mn.*

0,025	14,6	— 250	1 250	0,359
0,055	11,7	— 75	1 075	0,449
0,097	8,25	150	850	0,637
0,127	6,90	250	750	0,756
0,165	5,40	425	575	0,969
0,180	5,25	500	500	1,000
0,195	5,40	575	425	0,969
0,250	7,56	800	200	0,693
0,305	11,30	1 050	— 50	0,464
0,375	15,85	1 425	— 425	0,331
0,425	18,90	1 500	— 500	0,278

4° Moteur à vide. — *U* = 110 *V* *N* = 3 000 *t/mn.*

i courant d'excitation	I courant absorbé	WATTMÈTRE P_1	WATTMÈTRE P_2	cos φ calculé
0,027 A	14,0 A	950 W	— 575 W	0,141
0,037	12,0	825	— 475	0,153
0,065	8,48	600	— 325	0,170
0,115	6,04	450	— 200	0,217
0,150	3,20	275	— 50	0,370
0,170	1,36	150	75	0,866
0,180	1,15	110	110	1,000
0,190	1,64	175	50	0,721
0,210	2,10	200	0	0,500
0,245	4,45	350	— 125	0,265
0,295	5,43	495	— 75	0,386
0,350	5,93	600	75	0,597
0,430	7,82	850	300	0,771

Remarque. — Dans une même série de mesures, les valeurs correspondantes de U, I, P et cos φ ne sont pas indépendantes, elles sont liées par la relation $P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$. En déterminant, comme nous l'avons fait, la valeur de cos φ à l'aide des deux lectures au wattmètre P_1 et P_2, il est possible de calculer I et d'obtenir une valeur plus précise du courant absorbé que par sa mesure directe.

5. — Traçons et interprétons les courbes en V.

1° *Moteur à pleine charge.* — Nous portons en abscisses les valeurs

de i et en ordonnées les valeurs correspondantes de I. Avec les mêmes abscisses, nous traçons la courbe de cos φ en fonction de i (fig. 3).

La figure montre que l'intensité I absorbée par le moteur est minimum (I = 10,5 A), quand l'excitation a pour valeur i = 0,195 ampère. A ce minimum correspond le maximum du facteur de puissance, cos φ = 1.

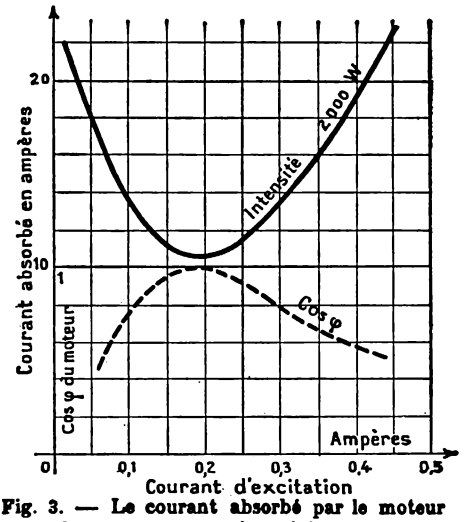


Fig. 3. — Le courant absorbé par le moteur synchrone passe par le minimum 10,5 A quand l'excitation est 0,195 A. Le cos φ du moteur atteint alors la valeur 1.

Pour des valeurs décroissantes de i, le courant I absorbé par le moteur augmente ainsi que le déphasage φ. Le moteur insuffisamment excité prend au réseau de l'énergie magnétisante ou réactive. Le courant I est déphasé en arrière de la tension.

Pour des valeurs croissantes de l'excitation i, le courant absorbé par le moteur augmente, ainsi que le déphasage φ. Le moteur, surabondamment excité, fournit au réseau de l'énergie magnétisante ou réactive. Le courant I est déphasé en avant de la tension.

Ces faits expliquent l'emploi d'un moteur synchrone pour améliorer le facteur de puissance d'une installation.

Si le courant d'excitation diffère beaucoup, en plus ou en moins, de la valeur correspondant à la pointe du V, le moteur absorbe un courant intense, il est peu stable; facilement il se décroche et s'arrête.

2° Moteur en surcharge, à demi-charge et à vide. — Traçons toutes les courbes en V avec les mêmes axes de coordonnées et à la même échelle (fig. 4).

Leur comparaison montre que :

a) les courbes sont plus pointues quand la puissance mécanique demandée au moteur est moindre;

b) les points d'intensité minimum absorbée se rapprochent de l'axe des ordonnées quand le moteur fournit une puissance mécanique moindre; la réaction d'induit dans le moteur est en effet plus faible et il faut une plus faible excitation pour la compenser;

c) la marge possible de variation de l'excitation sans décrochage du moteur synchrone est plus grande quand le moteur est peu chargé.

Aussi pour améliorer le facteur de puissance des grosses installations électriques ou des réseaux de distribution, emploie-t-on de plus en plus

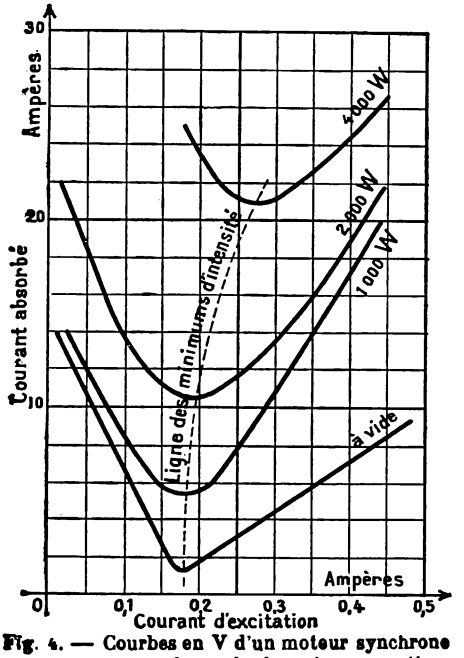


Fig. 4. — Courbes en V d'un moteur synchrone pour quatre valeurs de la puissance active. Les minimums de courant absorbé correspondent à un courant d'excitation plus intense pour les charges plus élevées du moteur.

des moteurs synchrones qui ne fournissent pas d'énergie mécanique. Ils fonctionnent à vide, on les nomme des *compensateurs de phase*. Ils jouent le rôle de *génératrices d'énergie réactive*.

Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit. Essais à vide et en charge. Rendement Couple.

1. — Examinons le moteur à essayer.

C'est un moteur fabriqué en 1943. La carcasse est en fonte; le rotor, monté sur billes, porte du côté de la poulie, à l'intérieur du flasque, un ventilateur qui aspire l'air du dehors à travers l'espace ménagé entre la carcasse et le stator pour refroidir les tôles.

La particularité de la machine est que *le stator est bobiné en fil d'aluminium :* les essais montreront si cette construction est recommandable. La cage d'écureuil est coulée d'une seule pièce en aluminium; ce mode de fabrication est employé normalement depuis plusieurs années.

La plaque signalétique porte les indications suivantes :

Puissance : 3,5 *ch. en service continu; Tension :* 200 — 350 *volts; Intensité :* 12 — 6,9 *ampères; Vitesse :* 1 400 *tours par minute; cos* φ = 0,74.

Vous savez que la double tension ainsi mentionnée signifie que le stator doit être couplé en triangle pour la tension de 200 volts et en étoile pour 350. Le moteur pourrait être démarré en étoile-triangle sous 200 volts.

La plaque de bornes est du modèle habituel (fig. 1). Nous emploierons le couplage en triangle.

2. — Le glissement d'un moteur est important à connaître, mais difficile à déterminer avec précision dans le cas d'un moteur à cage.

Soit N tours par minute la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la vitesse de rotation du champ tournant produit par le stator, N' tours par minute la vitesse du rotor. On nomme *coefficient de glissement* ou plus brièvement *glissement* du moteur le rapport

$$g = \frac{N - N'}{N}$$

Par exemple, le glissement d'un moteur à quatre pôles alimenté à la fréquence de 50 périodes par seconde et tournant à 1 400 tours par minute est :

$$g = \frac{1\,500 - 1\,400}{1\,500} = 0{,}066$$

On démontre[1] que le rendement du rotor, soit le rapport de la puissance qu'il fournit à la poulie à la puissance qu'il reçoit du stator, est $\eta = 1 - g$.

a) *Détermination du glissement par la mesure directe de N et N'.* Pour déterminer le glissement par la formule de définition $g = \frac{N - N'}{N}$ (1) avec une approximation de quelques centièmes, les vitesses N et N' doivent être mesurées avec une grande précision. Montrons-le dans le cas du glissement $g = 0{,}04$ d'un moteur à quatre pôles alimenté avec du courant à 50 périodes par seconde. Ici, N = 1 500 *t/mn*.

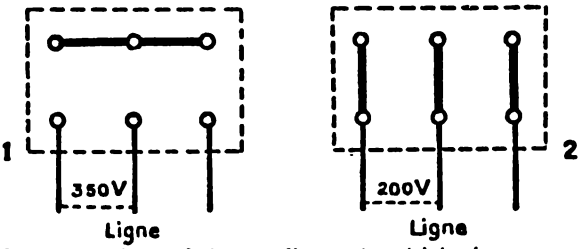


Fig. 1. — Plaque de bornes d'un moteur triphasé.
1. Montage en étoile.
2. Montage en triangle.

Quand la valeur de g est mesurée à 5 pour 100 près, elle est comprise entre 0,038 et 0,042. De l'expression (1), nous tirons

$$N' = N\,(1 - g)$$

et la valeur de N' est comprise entre 1 437 et 1 443 tours par minute. Nous admettons qu'il n'y a pas d'erreur appréciable sur la vitesse N de synchronisme, hypothèse plausible si le moteur est alimenté par le réseau général de distribution d'énergie électrique.

Donc la vitesse N' doit être mesurée avec une erreur relative maximum de $\frac{3}{1\,440} \simeq 0{,}002$.

Avec les tachymètres et même les compte-tours, on ne peut habituellement obtenir une précision que de 0,01. La valeur du glissement d'environ 0,04 calculée à partir de la mesure directe de la vitesse N' du moteur serait donc connue à 10 pour 100 près.

b) *Détermination du glissement par une méthode stroboscopique. Expérience.* — Montons en bout d'arbre du moteur à 4 pôles un disque de carton portant 4 secteurs noirs alternant avec 4 secteurs blancs (fig. 2). Nous l'éclairons avec *une lampe à arc*[2] *alimentée à la même fréquence que le stator*, soit 50 périodes par seconde.

1. *Électricité industrielle. Machines électriques :* page 214.
2. A la rigueur, on peut se servir d'une lampe à incandescence à faible inertie calorifique par exemple d'une lampe dite monowatt de 40 watts.

Lorsque le rotor tourne, les secteurs noirs paraissent tourner lentement en *sens inverse* du mouvement de rotation réel du disque (fig. 3).

Comptons le nombre de secteurs noirs qui passent devant un repère fixe pendant 1 minute : soit 106. Le disque paraît donc tourner de 106 : 4 = 26,5 tours par minute. On démontre que N — N′ = 26,5. Le glissement est g = 26,5 : 1 500 = 0,0176.

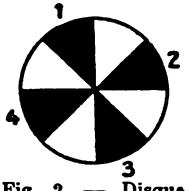


Fig. 2. — Disque d'environ 20 cm. de diamètre divisé en 4 secteurs blancs et 4 secteurs noirs pour déterminer le glissement d'un moteur asynchrone à 4 pôles.

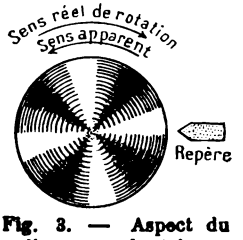


Fig. 3. — Aspect du disque pendant la rotation du moteur. On compte le *nombre n de secteurs noirs* qui passent en 1 *minute* devant un repère fixe et l'on a N — N′ = *n* : 4.

Explication. — L'arc s'éteint et se rallume 100 fois par seconde. L'éclairement du disque passe donc par des maximums qui se succèdent à des intervalles de 0,01 seconde ou 1 : 6 000 minute. L'œil, qui perçoit mal le déplacement pendant que l'éclairement est faible, voit le disque dans les positions qu'il occupe à chaque maximum. La figure 4 montre que ces positions se déplacent en sens inverse du mouvement de rotation avec une vitesse de N — N′ tours par minute, d'où l'impression d'une rotation en sens inverse du mouvement réel.

Remarque. — Comme le nombre (N — N′) de secteurs noirs qui passent devant le repère en 1 minute peut être facilement compté à 1 unité près, la valeur du glissement est déterminée avec une bonne précision. Toutefois le comptage n'est plus possible quand plus de 3 secteurs noirs passent par seconde devant le repère, ce qui correspond à un glissement g = 0,03, quel que soit le nombre de pôles du moteur.

Cette méthode stroboscopique n'est pas employée industriellement; on se contente de mesurer N′ avec un bon compteur de tours.

3. — Mesurons la résistance des enroulements du stator.

Nous nous servons d'un courant continu d'environ 10 ampères, d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

Les mesures faites à la température ambiante donnent, pour *une phase:*

1,22; 1,25; 1,29 ohms

soit en moyenne 1,25 ohm.

Le coefficient de température de l'aluminium est à peu près le même que celui du cuivre : quand la température du stator s'est élevée de 60°, la résistance devient

$$1{,}25 \times (1 + 0{,}004 \times 60) = 1{,}55 \text{ ohm.}$$

4. — Essai du moteur à vide.

La figure 5 est le schéma de branchement du moteur.

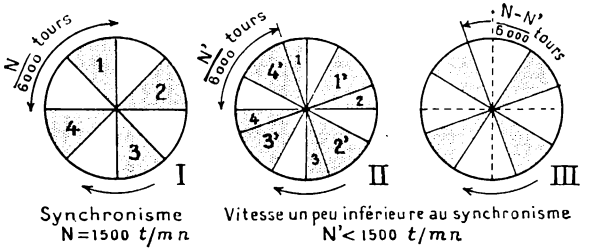


Fig. 4. — Les flèches du bas indiquent le sens de rotation du moteur asynchrone.

I. — Entre deux maximums d'éclairement, le disque fait $\frac{N}{6000} = \frac{1500}{6000} = \frac{1}{4}$ tour ; le secteur 1 vient en 2, 2 en 3, etc., et l'œil, qui n'a pas perçu le déplacement pendant que l'éclairement est faible, voit le disque immobile.

II. — Entre deux maximums d'éclairement, le disque fait $\frac{N'}{6000}$ tours, donc un peu moins de $\frac{1}{4}$ tour. Le secteur 1 vient en 1', 2 en 2', etc.

III. — Donc entre deux maximums d'éclairement, le disque paraît avoir tourné de $\frac{N - N'}{6000}$ tour en sens inverse du mouvement réel. En 1 minute, après 6000 maximums d'éclairement, il paraît avoir tourné, en sens inverse du mouvement réel de rotation, de $\frac{N - N'}{6000} \times 6000 = N - N'$ tours.

Un ampèremètre 0-15 ampères, dont on court-circuite les bornes pendant le démarrage, est monté dans l'une des phases d'alimentation; le voltmètre en dérivation entre deux fils de ligne est du calibre 0-300 volts. La puissance est mesurée par la méthode du double wattmètre [1].

Le moteur est d'abord porté à sa température de régime en le faisant fonctionner pendant une heure à pleine charge comme

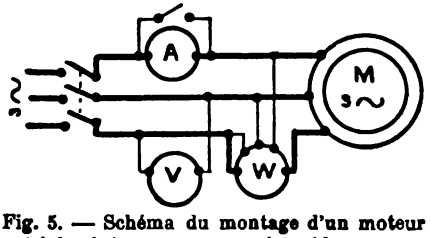


Fig. 5. — Schéma du montage d'un moteur triphasé à cage pour essai à vide.

1. Nous avons employé un wattmètre pour circuits triphasés équilibrés mesurant la puissance active et la puissance réactive.

il est indiqué au paragraphe suivant, puis on enlève la courroie pour l'essai à vide.

Les lectures faites ont été les suivantes :

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ. — ESSAI A VIDE

U	I	P_a	P_r	N'
210 V	8,7 A	360 W	3 120 WAr	1 474 *t/mn*

Avec ces mesures nous calculons :

1° le cos φ à vide, soit par la relation

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{UI\sqrt{3}},$$

soit en déterminant *tg* φ

$$tg\ \varphi = \frac{P_r}{P_a} = 8{,}7$$

et avec une table des rapports trigonométriques naturels la valeur correspondante du cosinus. Les deux modes de calcul donnent le même résultat : cos φ = 0,113.

2° le glissement à vide :

$$g = \frac{1\,500 - 1\,474}{1\,500} = 0{,}017.$$

5. — Essais du moteur en charge.

Nous lui faisons entraîner une génératrice à courant continu qui débite dans un rhéostat de charge (fig. 6).

Les mesures faites ont donné les résultats suivants :

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ. — ESSAIS EN CHARGE

LECTURES					CALCULS	
		PUISSANCE				
TENSION	INTENSITÉ	active P_a	réactive P_r	VITESSE	Cos φ	Glissement
204	15	4 350	3 000	1 386	0,82	0,076
205	13,5	3 795	2 850	1 400	0,79	0,066
205	11,6	3 030	2 730	1 417	0,74	0,055
208	9,4	1 800	2 805	1 442	0,526	0,039
208	9,1	1 470	2 910	1 447	0,45	0,035
208	8,8	450	3 120	1 472	0,14	0,019

Dans la figure 7 sont tracées les courbes de l'intensité absorbée, de

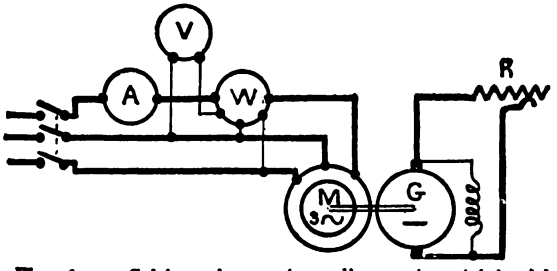


Fig. 6. — Schéma du montage d'un moteur triphasé à cage pour essai en charge.

la vitesse, du glissement, du facteur de puissance en fonction de la puissance absorbée par le moteur.

6.—Déterminons le rendement du moteur pour une charge déterminée.

Le procédé le plus commode consiste à évaluer séparément le rendement η_s du stator et η_r du rotor : le rendement du moteur est alors :

$$\eta = \eta_s \times \eta_r$$

Rendement du stator. — La puissance fournie au stator est P_a.

Les pertes comprennent :

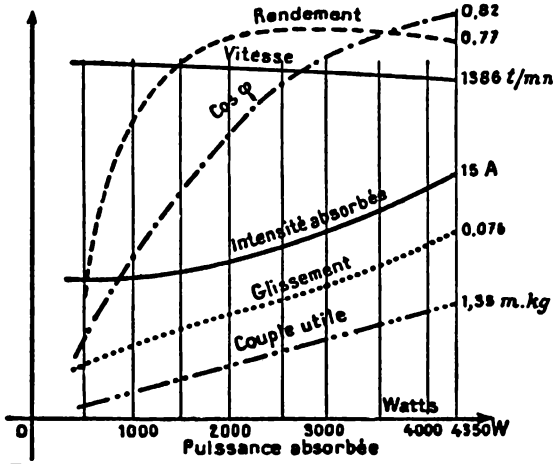


Fig. 7. — Les courbes de cette figure résument les résultats de l'essai du moteur. — Les nombres à droite donnent les échelles. — (Erratum : lire 2,35 m.*kg* et non 1,35 m.*kg*.)

1° les *pertes par effet Joule*, p_v, dans les enroulements du stator, proportionnelles au carré de l'intensité absorbée :

$$p_v = 1{,}5 . r . I^2$$

r est la résistance à chaud entre bornes du stator.

2° les *pertes magnétiques*, par hystérésis et courants de Foucault dans les tôles du stator. Ces pertes sont à peu près indépendantes de la charge

parce que le flux magnétique dans le stator alimenté à tension constante est sensiblement constant.

Une évaluation approximative, mais suffisante en général, de ces pertes, p_c, est tirée de l'essai à vide. On admet que les pertes à vide dans le rotor sont négligeables : en effet, la fréquence du flux dans le rotor est très faible et les pertes magnétiques y sont à peu près nulles; de même, les courants dans les conducteurs rotoriques sont peu intenses à vide. Donc en déduisant de la puissance absorbée à vide les pertes par effet Joule dans le stator, on obtient les pertes constantes. En réalité, on compte ainsi, dans les pertes constantes du stator, les pertes mécaniques par frottement dans le rotor, mais cette attribution à un organe de pertes qui se produisent dans un autre n'influe que très peu sur le résultat final.

Le rendement du stator est donc environ

$$\eta_s = \frac{P_a - (p_s + p_c)}{P_a}$$

Rendement du rotor. — Vous savez qu'il a pour valeur, g étant le glissement, $\eta_r = 1 - g$.

Calcul du rendement du moteur à pleine charge. — Lorsqu'il absorbe 3 030 watts, soit 11,6 ampères, son glissement est alors $g = 0{,}055$.

A vide, le moteur absorbe 360 watts, l'intensité du courant dans le stator est 8,7 ampères. Puisque la résistance est 1,55 ohms *par phase*, les pertes par effet Joule atteignent

$$1{,}5 \times 1{,}55 \times \overline{8{,}7}^2 = 2{,}34 \times \overline{8{,}7}^2 = 177 \text{ watts.}$$

Les pertes constantes ont donc pour valeur :

$$360 - 177 = 183 \text{ watts.}$$

A pleine charge, les pertes en chaleur Joule dans le stator se montent à

$$2{,}34 \times \overline{11{,}6}^2 = 314 \text{ watts.}$$

Le total des pertes dans le stator est ainsi

$$183 + 314 = 497 \text{ watts}$$

et le rendement du stator a pour valeur

$$\eta_s = \frac{3\,030 - 497}{3\,030} = 0{,}84$$

D'autre part, le rendement du rotor est :

$$\eta_r = 1 - g = 1 - 0{,}055 = 0{,}945.$$

Le rendement du moteur atteint donc :

$$\eta = \eta_s \times \eta_r = 0{,}84 \times 0{,}945 = 0{,}79.$$

Dans le tableau qui suit, le rendement est calculé pour les différentes charges réalisées dans l'essai en charge. La courbe du rendement en

fonction de la puissance absorbée est tracée dans la figure 7. Ce rendement passe par un maximum au voisinage de la pleine charge.

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ. — CALCUL DU RENDEMENT

Puissance absorbée.	Intensité dans le stator.	Pertes constantes.	Pertes variables.	Pertes totales dans le stator.	Puissance utile du stator.	Rendement du stator.	Rendement du rotor.	Rendement du moteur.
4 350	15	183	526	709	3 641	0,83	0,924	0,77
3 795	13,5	183	426	609	3 186	0,84	0,934	0,78
3 030	11,6	183	314	497	2 533	0,84	0,945	0,79
1 800	9,4	183	203	386	1 414	0,79	0,961	0,76
1 470	9,1	183	194	377	1 093	0,75	0,965	0,72
450	8,8	183	181	364	86	0,19	0,982	0,18

Le rendement d'un moteur de même puissance dont le stator est bobiné avec du fil de cuivre atteint 0,825. Celui du moteur à enroulement statorique en aluminium est donc plus faible, mais il reste satisfaisant. Le bobinage est moins solide mécaniquement, on peut craindre qu'il ne dure pas longtemps.

7. — Calcul du couple moteur.

Soit : P_a watts la puissance absorbée par le moteur, η le rendement de la machine et N' sa vitesse en tours par minute[1], $\mathcal{M}$ le moment du couple moteur en mètres-kilogrammes. Nous savons que :

$$\mathcal{M} = 0,973 \frac{P_a \eta}{N'} \ m.kg.$$

Dans le cas du moteur essayé, les valeurs calculées sont indiquées dans le tableau suivant :

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ. — MOMENT DU COUPLE MOTEUR

P_a	η	N'	$\mathcal{M}$
4 350 W	0,77	1 386 *t/mn*	2,35 *m. kg*
3 795	0,78	1 400	2,06
3 030	0,79	1 417	1,58
1 800	0,76	1 442	0,88
1 470	0,72	1 447	0,71
450	0,18	1 472	0,053

La courbe de $\mathcal{M}$ en fonction de la puissance absorbée P_a est tracée dans la figure 7.

1. Voir 34e Manipulation, § 2.

Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit. Essai au frein de Prony.

Dans la manipulation précédente, vous avez déduit le couple utile d'un moteur asynchrone triphasé des mesures de plusieurs grandeurs électriques et de la vitesse de rotation.

Dans celle-ci, vous allez mesurer directement le couple utile du même moteur. Vous mesurerez en même temps la vitesse de rotation, N′ tours par minute, ce qui permettra de calculer la puissance utile disponible sur la poulie. Enfin, vous noterez aussi la puissance absorbée pour chaque valeur du couple utile; elle vous servira à déterminer le rendement du moteur.

Vous opérerez sur le moteur déjà étudié, ce qui vous permettra de confronter les résultats obtenus par les deux méthodes pour le couple utile et le rendement.

1. — Rappelons le principe de la mesure d'un couple avec un frein de Prony.

Cette mesure est étudiée dans le cours de mécanique [1].

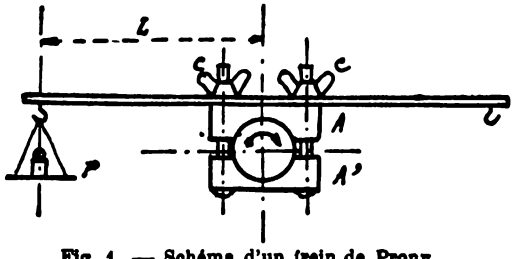


Fig. 1. — Schéma d'un frein de Prony.

Sur la poulie du moteur (fig. 1) sont montés deux sabots de bois serrés par des boulons. L'un des sabots se prolonge par un levier portant un plateau dans lequel on peut mettre des poids P de diverses valeurs [2]. L'appareil, poids P enlevé, est en équilibre

1. Voir *Mécanique*, par Basquin, 2e partie, 3e leçon.
2. Le plateau et les poids peuvent être remplacés par le dynamomètre (fig. 2).

par rapport à l'axe O et son poids propre n'intervient pas dans les mesures.

Quand le moteur tourne dans le sens de la flèche, en serrant convenablement les sabots et en chargeant le plateau de poids P, on maintient le levier horizontal. Vous savez que, dans ces conditions, le moment $\mathcal{M}$ du couple moteur est $\mathcal{M} = L \times P$; il est évalué en mètres-kilogrammes si L est exprimé en mètres et P en kilogrammes.

Remarquez que l'énergie mécanique produite par le moteur est transformée en chaleur par le frottement de la poulie sur les sabots. Le frein absorbe l'énergie du moteur, d'où son nom de *frein d'absorption.*

Pour que les sabots ne s'échauffent pas jusqu'à brûler, on les arrose par un courant d'eau. Vous calculerez facilement que pour enlever la chaleur quand la puissance dépensée est 1 kilowatt, il faut, par minute, 0,30 litre d'eau passant de la température de 10° à celle de 60°. En pratique, parce que les échanges de chaleur sont lents, on emploiera 3 ou 4 fois la quantité d'eau calculée. On se servira d'eau savonneuse bien onctueuse pour que le coefficient de frottement de la fonte sur le bois reste invariable pendant une mesure.

2. — Fabrication d'un frein de Prony.

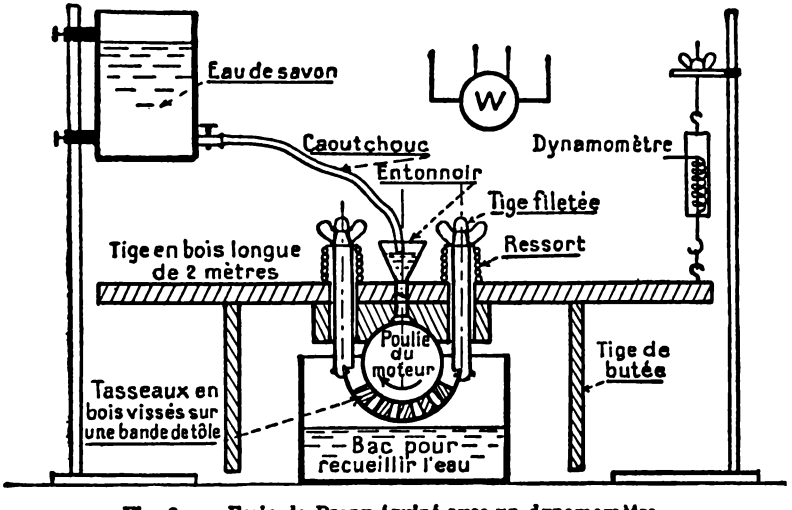


Fig. 2. — Frein de Prony équipé avec un dynamomètre.

C'est un travail facile. La figure 2 est le schéma de l'appareil. Pour qu'il soit équilibré, le frein est symétrique par rapport au plan vertical qui passe par l'axe de la poulie. Le sabot supérieur est un bloc de

hêtre épousant la forme bombée de la jante. Un trou muni d'un entonnoir amène l'eau savonneuse que des pattes d'araignée répartissent sur toute la surface du sabot. Le sabot inférieur est constitué par des tasseaux de hêtre vissés sur une bande de tôle flexible. Le serrage du frein s'effectue par des écrous à oreilles et deux tiges filetées. Deux forts ressorts sous les écrous rendent le serrage progressif.

Le levier du frein est une tige de bois longue de 2 mètres vissée sur le sabot supérieur et portant deux jambes pour limiter l'entraînement du frein dans un sens ou dans l'autre.

A l'une de ses extrémités, ce levier est attaché à un dynamomètre capable de mesurer une force de 3 kilogrammes. Le dynamomètre est déplaçable verticalement au moyen d'une tige filetée pour maintenir horizontal le bras de levier du frein.

Un réservoir fixé à un support contient de l'eau de savon. Un bac, placé sous le frein, recueille le liquide qui a servi.

3. — Exécution d'une mesure.

Deux opérateurs sont nécessaires. L'un, A, serre lentement les écrous du frein en surveillant le wattmètre qui mesure la puissance absorbée par le moteur. Lorsque le wattmètre indique la valeur désirée, l'autre observateur B règle le dynamomètre pour que le bras du levier du frein soit horizontal. Il lit l'indication du dynamomètre pendant que l'opérateur A mesure au tachymètre la vitesse du moteur.

En faisant varier la puissance absorbée d'environ 500 watts d'une mesure à la suivante, nous avons obtenu les résultats que voici :

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ
ESSAI AU FREIN DE PRONY

Puissance absorbée	Vitesse	Couple
900 W	1 460 *t/mn*	0,30 *m.kg*
1 400	1 445	0,60
2 000	1 435	1,05
2 500	1 425	1,42
3 000	1 415	1,60

4. — Avec les mesures précédentes, calculez la puissance utile du moteur et son rendement sous diverses charges.

a) Si N′ est la vitesse du moteur, $\mathfrak{M}$ le moment du couple mesuré au frein, la puissance utile du moteur est :

$$P_u = \frac{2\pi}{60} N' \mathfrak{M}$$

kgm/s *t/mn* *m.kg*

P_u est exprimé en kilogrammètres par seconde si N' l'est en tours par minute et $\mathcal{M}$ en mètres-kilogrammes.

Comme 1 kilogrammètre par seconde vaut 9,81 watts, P_u vaut, en watts :

$$P_u = \frac{2\pi}{60} \times 9{,}81 \times N' \times \mathcal{M}; \text{ soit } \boxed{P_u = 1{,}03\ N'\ \mathcal{M}}$$

W t/mn m.kg

b) Le rendement η du moteur est égal au quotient de la puissance utile P_u par la puissance absorbée P.

Nous pouvons donc compléter le tableau précédent comme ci-dessous

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ. — CALCUL DU RENDEMENT

N° de l'essai 1	Puissance absorbée P 2	Vitesse N' 3	Moment du couple $\mathcal{M}$ 4	Puissance utile P_u 5	Rendement 6
1	900 W	1 460 t /mn	0,30 m /kg	450 W	0,50
2	1 400	1 445	0,60	893	0,63
3	2 000	1 435	1,05	1 552	0,78
4	2 500	1 425	1,42	2 084	0,83
5	3 000	1 415	1,60	2 332	0,78

Vous tracerez, avec les mêmes échelles que pour le tableau page 271, les courbes de la vitesse, du couple utile, de la puissance utile et du rendement en fonction de la puissance absorbée.

Vous constaterez que les deux méthodes donnent des résultats concordants, c'est-à-dire qui présentent entre eux des différences inférieures ou au plus égales aux limites maximums des erreurs possibles de mesures.

5. — Le frein de Prony peut être équipé avec une balance Roberval au lieu d'un dynamomètre.

La figure 3 suffit pour indiquer le montage.

Quand on emploie une balance, il est plus commode de modifier ainsi l'exécution d'une mesure : on place d'abord un poids P sur la balance,

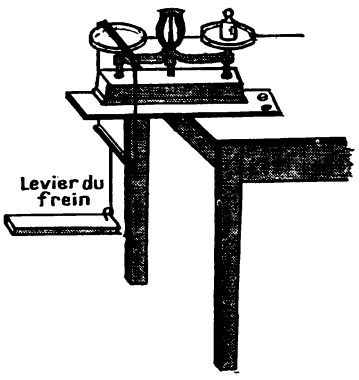


Fig. 3. — Une balance Roberval remplace le dynamomètre du montage de la figure 2.

on règle ensuite le serrage du frein pour que le levier de l'appareil soit horizontal, puis on note l'indication du wattmètre et l'on mesure la vitesse N' du moteur.

6. — Le couple et la pointe de courant au décollage sont intéressants à connaître.

a) Le couple au démarrage se mesure en bloquant les sabots du frein de Prony sur la poulie du moteur. On ferme l'interrupteur de ligne et on lit aussitôt l'indication du dynamomètre. L'opération doit être brève, car le courant de démarrage est intense, et s'il durait plusieurs secondes, il détériorerait l'enroulement du stator.

La mesure faite a donné 2,56 *m.kg* ou 25,9 *m.N.*

b) On mesure l'intensité au décollage avec un ampèremètre à aiguille butée. C'est un ampèremètre dont l'aiguille peut être amenée, avant une mesure, à une position quelconque de son échelle et calée pour l'empêcher de retourner au zéro sans gêner son déplacement vers l'autre extrémité de l'échelle. On cherche par tâtonnements une position de l'aiguille pour laquelle elle se déplace à peine sous l'action du courant de démarrage dont elle indique alors l'intensité. La précision d'une telle mesure est faible, moindre que 0,1.

Avec le moteur étudié, on a trouvé 63 ampères, soit plus de 5 fois l'intensité normale.

En désignant $\mathfrak{M}_d$ le couple de démarrage, $\mathfrak{M}_n$ le couple en charge normal, I_d l'intensité de démarrage, I_n l'intensité normale et g le glissement du moteur à cette charge, on démontre la relation

$$\mathfrak{M}_d \simeq \mathfrak{M}_n \times \left(\frac{I_d}{I_n}\right)^2 \times g$$

qui permet de calculer l'une des grandeurs $\mathfrak{M}_d$ ou I_d connaissant l'autre.

Pour le moteur étudié on trouve :

$$\mathfrak{M}_d \simeq 1{,}58 \times \left(\frac{63}{11{,}6}\right)^2 \times 0{,}055 \simeq 2{,}60 \ m\text{-}kg.$$

valeur très voisine du résultat de la mesure directe.

Moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné.

Les essais de ce type de moteur sont analogues à ceux d'un moteur à cage. Comme particularités, nous indiquerons la mesure du rapport de transformation, la détermination du glissement avec un voltmètre et la séparation des pertes magnétiques et des pertes mécaniques dans l'essai à vide.

1. — Examinons la plaque signalétique du moteur à essayer.

Il s'agit d'un moteur de bonne construction, monté sur billes.

La plaque porte les indications suivantes :

110 — 190 *volts*; 14,4 *ampères*; 4,5 *chevaux*; 1 420 *tours par minute.*

Nous couplerons donc le stator en *étoile* pour alimenter avec le réseau à 200 volts.

2. — Résistance des enroulements du stator.

Mesurée entre bornes, à froid, elle a pour valeur 0,68 ohm.

Pour un échauffement de 60°, elle atteindra environ

$$0{,}68 \times 1{,}25 = 0{,}85 \text{ ohm.}$$

3. — Résistance des enroulements du rotor.

La valeur de cette résistance ne sert pas dans le calcul du rendement. Nous la mesurons seulement à titre de renseignement.

Nous trouvons entre bagues 0,079 ohm, à froid, résistance petite, ce qui fait prévoir un faible glissement et un bon rendement.

4. — Rapport de transformation rotor-stator.

Vous savez qu'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné est comparable à un transformateur triphasé dont le stator est le primaire et le rotor le secondaire. L'analogie, grande quand le stator est alimenté et le rotor ouvert et arrêté, est moindre quand le rotor est en court-circuit et en marche.

Pour mesurer le rapport de transformation, nous appliquons la tension normale du réseau aux bornes du stator et, avec un voltmètre, nous

relevons d'une part la tension entre deux bornes du stator, soit 208 volts, d'autre part entre deux bagues du rotor en faisant tourner très lentement l'induit à la main pour déterminer la tension maximum, nous trouvons 57 volts. Le rapport cherché est 57 : 208.

Ce rapport sert à calculer approximativement l'intensité dans le rotor à pleine charge pour choisir la section des conducteurs qui relient les bagues au rhéostat de démarrage. La mesure directe de cette intensité avec un ampèremètre n'est pas possible parce que les courants rotoriques sont à très basse fréquence (3 à 4 périodes par seconde).

Pour le moteur étudié, l'intensité des courants dans le rotor est environ

$$14{,}4 \times \frac{208}{57} \simeq 52 \text{ ampères.}$$

5. — On calcule le glissement d'un moteur à bagues en déterminant la fréquence des courants dans le rotor.

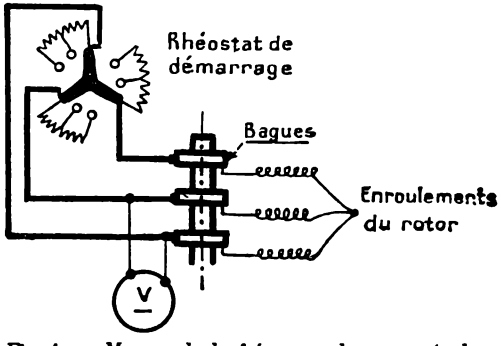


Fig. 1. — Mesure de la fréquence des courants dans le rotor d'un moteur à bagues.

Ce procédé est plus commode que la méthode stroboscopique.

On branche un *voltmètre* à courant continu *polarisé* (à aimant), entre deux bagues du rotor après mise en court-circuit du rhéostat de démarrage. Chaque oscillation de l'aiguille correspond à une onde du courant. On compte ces oscillations pendant un nombre connu de secondes, soit n en t secondes, la fréquence des courants rotoriques est :

$$F = \frac{n}{t} \text{ périodes par seconde.}$$

Comment le glissement dépend-il de cette fréquence?

Quand un stator à $2p$ pôles est alimenté par des courants triphasés de fréquence f, des champs tournants parcourent l'entrefer à une vitesse N tours par minute telle que :

$$f = \frac{pN}{60} \qquad (1)$$

Le rotor tourne dans le même sens que les champs à une vitesse N'. Des courants sont induits dans les conducteurs du rotor. Au point de vue

induction, tout se passe comme si le rotor était fixe, le champ tournant à la vitesse N — N' tours par minute. La fréquence des courants induits est

$$F = \frac{p\,(N - N')}{60}. \qquad (2)$$

En divisant membre à membre les relations (2) et (1)

$$\frac{N - N'}{N} = \frac{F}{f}$$

Or $\frac{N - N'}{N}$ est le glissement g du rotor, donc $g = \frac{F}{f}$.

Par exemple, dans le cas du moteur à vide, nous comptons 5 oscillations de l'aiguille en 30 secondes :

$$F = \frac{5}{30} = 0,166 \text{ p/s}$$

Donc $$g = \frac{0,166}{50} = 0,003\,3$$

De l'expression $g = \frac{N - N'}{N}$ on tire $N' = N\,(1 - g) = 1\,495$ *t/mn.*

6.— Essai du moteur à vide.

La figure 2 indique le montage des appareils. Nous utilisons un wattmètre pour circuits triphasés équilibrés permettant la mesure de la puissance active et de la puissance réactive.

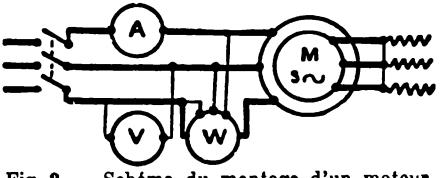


Fig. 2. — Schéma du montage d'un moteur triphasé à bagues pour essai à vide.

Les lectures faites ont été

MOTEUR ASYNCHRONE N° ... — ESSAI A VIDE

INTENSITÉ absorbée I	TENSION U	PUISSANCE	
		active P_a	réactive P_r
8,7 A	208 V	270 W	3 120 VAr

Avec ces nombres nous calculons :

1° le facteur de puissance à vide, $\cos\varphi = 0,086$;

2° les pertes constantes magnétiques et mécaniques en déduisant de la puissance absorbée les pertes par effet Joule dans le stator :

$$p_s = 270 - 1,5 \times 0,68 \times \overline{8,7}$$
$$= 270 - 77 = 193 \text{ watts.}$$

7. — Séparation des pertes magnétiques et mécaniques.

Cette séparation, que l'on néglige d'effectuer dans le cas des petits moteurs, permet d'obtenir, avec plus de précision, le rendement des moteurs puissants.

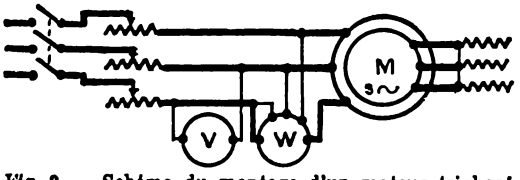


Fig. 3. — Schéma du montage d'un moteur triphasé à bagues pour séparation des pertes magnétiques et mécaniques.

On alimente le moteur à vide successivement avec des tensions échelonnées depuis le tiers environ de la tension normale jusqu'à 10 à 15 pour 100 en plus de cette tension en conservant toujours la fréquence standard. Les pertes mécaniques restent à peu près indépendantes de la tension qui ne fait guère varier la vitesse; les pertes électriques et magnétiques diminuent quand la tension baisse et s'annulent avec la tension. Donc en traçant la courbe des pertes à vide en fonction de U et en prolongeant cette courbe jusqu'à U = 0 on obtient les pertes mécaniques seules.

Évidemment une telle détermination par extrapolation n'est qu'approximative.

Un transformateur triphasé avec nombreuses prises au secondaire conviendrait bien pour cet essai. A défaut, nous avons intercalé des résistances égales en série avec les trois enroulements du stator (fig. 3).

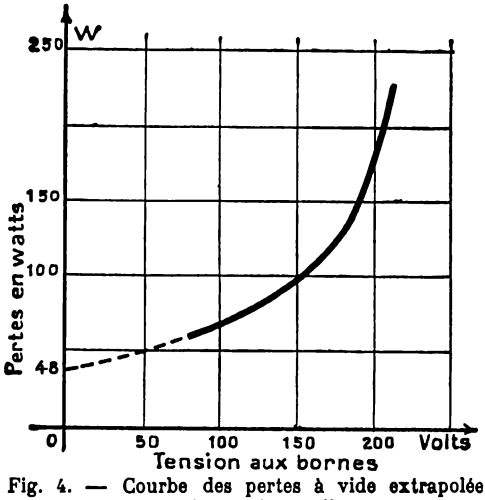


Fig. 4. — Courbe des pertes à vide extrapolée jusqu'à tension nulle.

Les mesures faites ont donné :

Tension	208	201	178	159	96 volts
Puissance absorbée	270	195	13	105	65 watts.

Ces résultats ont servi à tracer la courbe de la figure 4. L'extrapolation montre que pour U = 0, p égale environ 48 watts.

Les pertes mécaniques sont donc évaluées à 48 watts et les pertes magnétiques à 193 — 48 = 155 watts.

8. — Essai du moteur en charge.

Nous chargeons le moteur en lui faisant entraîner une dynamo shunt qui débite dans une résistance variable (fig. 5). L'essai a donné les résultats suivants :

MOTEUR ASYNCHRONE N°... — ESSAIS EN CHARGE

LECTURES					CALCULS		
U	I	Puissance abs. active	Puissance abs. réactive	Fréquence rotorique	cos φ	g	Vitesse N'
1	2	3	4	5	6	7	8
207 V	8,8 A	460 W	3 100 VAr	9 pér. en 50 s	0,146	0,0036	1 490 *t/mn*
207	10,3	2 010	2 970	27 — 30 s	0,56	0,018	1 473
208	12,0	3 015	2 950	27 — 20 s	0,70	0,027	1 460
208	13,6	3 855	2 940	54 — 30 s	0,79	0,036	1 446
209	14,0	4 080	2 940	59 — 30 s	0,81	0,039	1 440

Les courbes de cos φ, *g* et N' en fonction de la puissance absorbée sont tracées figure 6.

9. — Calculons le rendement par la méthode des pertes séparées.

Parce que les pertes mécaniques constantes ont été évaluées (48 W), il nous est possible de calculer la puissance fournie par le stator au rotor.

Soit le cas où la puissance active absorbée est 4 080 watts.

Les pertes par effet Joule dans le stator atteignent

$$1{,}50 \times 0{,}85 \times \overline{14}^2 = 250 \text{ watts.}$$

Ajoutons-y les pertes magnétiques constantes 155 watts, le total des pertes dans le stator est

250 + 155 = 405 watts.

Le stator transmet au rotor

4 080 — 405 = 3 675 watts.

Dans le rotor, les pertes par effet Joule sont égales au produit de la puissance reçue par le glissement, soit :

3 675 × 0,039 = 143 watts.

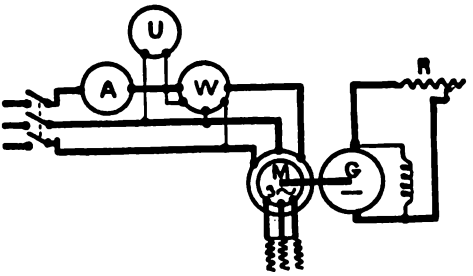


Fig. 5. — Schéma de montage d'un moteur triphasé à bagues pour essai en charge.

Les pertes mécaniques constantes sont de 48 watts.

Au total, les pertes dans le moteur sont :

1° pertes magnétiques constantes	155	watts
2° pertes mécaniques constantes	48	
3° pertes dans le cuivre du stator	250	
4° pertes dans le cuivre du rotor.....	143	
En tout	596	watts.

La puissance utile à la poulie est

$$4\,080 - 596 = 3\,484 \text{ watts},$$

et le rendement

$$\eta = \frac{3\,484}{4\,080} = 0{,}85.$$

En calculant le rendement par le procédé plus simple que nous avons employé pour le moteur à cage, nous trouvons le même résultat : la séparation des pertes magnétiques et mécaniques ne s'impose donc pas quand il s'agit de petits moteurs.

Pour les différentes puissances absorbées mesurées dans l'essai en charge, le calcul du rendement donne :

Puissances absorbées	460	2 010	3 015	3 855	4 080 W
Rendement	0,11	0,74	0,77	0,82	0,85

La courbe du rendement en fonction de la puissance absorbée est tracée dans la figure 6.

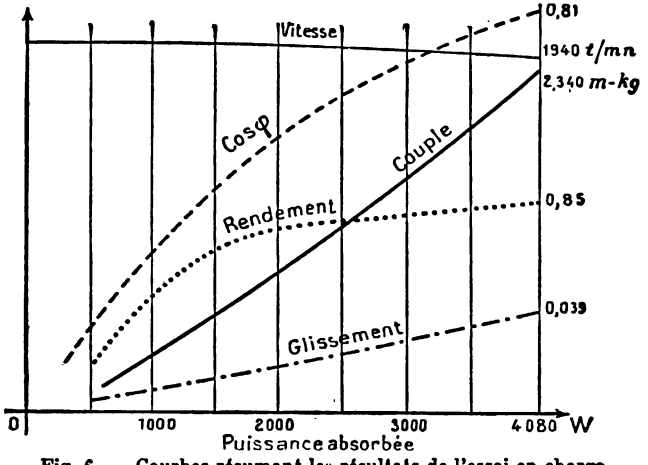


Fig. 6. — Courbes résumant les résultats de l'essai en charge d'un moteur à bagues.

Remarquez que le rendement de ce moteur est bien meilleur que celui

du moteur à cage à cause du bobinage en cuivre largement dimensionné.

10. — Calculons le couple du moteur pour différentes charges.

Quand la puissance utile à l'arbre d'un moteur est $P_a \times \eta$ watts, la vitesse N' tours par minute, le couple a pour valeur

$$\mathcal{M} = 0,973 \frac{P_a \eta}{N'} \text{ mètre-kilogrammes.}$$

Le calcul donne pour les différentes puissances mesurées lors de l'essai en charge :

MOTEUR ASYNCHRONE N°... — MOMENT DU COUPLE MOTEUR

Puissance absorbée	Rendement	Vitesse	Couple
460 W	0,11	1 490 *t/mn*	0,033 m. kg.
2 010	0,74	1 473	0,985
3 015	0,77	1 460	1,540
3 855	0,82	1 446	2,120
4 080	0,85	1 440	2,340

La courbe de ce couple est tracée dans la figure 6.

11. — Mesurons le couple au démarrage.

Nous employons le dispositif expérimental décrit à propos du moteur shunt.

Le rhéostat de démarrage est entièrement en circuit.

Nous avons trouvé 1,020 mètre-kilogramme en alimentant le stator sous 208 volts.

Ce couple est inférieur à la moitié du couple normal. Pour obtenir un couple plus grand, il suffirait d'employer un rhéostat de démarrage moins résistant.

Commutatrice triphasée.

1. — Examinons la machine à essayer[1].

Du côté du collecteur, c'est une dynamo à courant continu excitée en dérivation; du côté opposé, l'arbre porte trois bagues isolées sur lesquelles appuient trois frotteurs : c'est un alternateur à induit tournant.

Elle est bipolaire et possède deux pôles auxiliaires. Les pièces polaires des deux pôles principaux sont munies d'amortisseurs constitués par des tiges de cuivre qui traversent les tôles et sont réunies à l'avant et à l'arrière par des bandes de cuivre; ces amortisseurs sont des portions de cage d'écureuil, on les nomme *amortisseurs à grille.*

La commutatrice tourne à 3 000 tours par minute et fournit une puissance de 3 000 watts, soit un courant continu de 25 ampères sous la tension de 120 volts. Du côté alternatif, elle absorbe en courants triphasés 26,6 ampères avec 83 volts entre bagues quand son facteur de puissance est égal à l'unité.

Lorsqu'elle fonctionne sur le réseau triphasé à 200 volts, elle est complétée par un transformateur triphasé de 4 000 volts-ampères, 200 — 83 volts avec prises à 50 volts pour le démarrage en asynchrone.

Pour l'essayer, nous l'alimentons directement avec un alternateur triphasé à 50 périodes par seconde dont la tension peut varier de 40 à 120 volts.

2. — Deux modes de démarrage sont possibles.

1° *En l'alimentant du côté collecteur par du courant continu.*

Elle démarre comme un moteur shunt avec un rhéostat de démarrage. Du côté alternatif, on installe un indicateur de phases et de synchronisme pour la brancher sur la ligne d'alimentation comme un moteur synchrone.

2° *En moteur asynchrone.*

Les amortisseurs fonctionnent comme une cage d'écureuil. Pour réduire l'intensité absorbée, on démarre sous 50 volts pour augmenter la tension à 83 volts quand l'induit est en pleine vitesse.

1. C'est une commutatrice type KSN 20/2 construite par la Cie Gle Électrique de Nancy.

Une précaution est nécessaire pour obtenir aux balais une polarité déterminée. Le circuit de l'inducteur est coupé pendant le démarrage. Un voltmètre polarisé est branché entre les balais. L'aiguille de ce voltmètre oscille lentement quand l'induit approche du synchronisme. Quand elle se déplace dans le sens indiquant la polarité désirée, on ferme le circuit de l'inducteur.

Le démarrage effectué, on règle l'excitation pour que l'intensité absorbée du côté alternatif soit minimum quand la commutatrice fournit l'intensité voulue en courant continu.

3. — Mesure des résistances des enroulements.

Il est préférable de faire cette mesure à chaud, c'est-à-dire après que la machine a fonctionné au moins deux heures à pleine charge pour atteindre sa température de régime.

Nous avons trouvé :

Inducteur.

Indication du voltmètre : 120 volts.
Indication de l'ampèremètre : 0,70 ampère.

Résistance : $\frac{120}{0{,}70} = 171$ ohms.

Induit.

1° *Sans l'enroulement des pôles auxiliaires, tension prise sous les balais.*
Indication du voltmètre : 10,3 volts.
Indication de l'ampèremètre : 24,75 ampères.

Résistance : $\frac{10{,}3}{24{,}75} = 0{,}415$ ohm.

2° *Y compris les pôles auxiliaires, tension prise à la plaque de bornes.*
Indication du voltmètre : 10,9 volts.
Indication de l'ampèremètre : 24,75 ampères.

Résistance : $\frac{10{,}9}{24{,}75} = 0{,}44$ ohm.

A partir de la résistance r de l'induit entre les balais, on peut calculer la résistance entre bagues du côté alternatif.

Les deux moitiés de l'enroulement de l'induit en parallèle entre les balais ont ensemble une résistance r, soit $2r$ pour chacune d'elles et $4r$ pour la résistance totale de l'enroulement. Du côté des bagues, cet enroulement est divisé en trois parties couplées en triangle, la résistance d'une partie est $\frac{4r}{3}$ et la résistance entre bagues $r' = \frac{8r}{9}$, soit pour la machine essayée :

$$r' = \frac{0{,}415 \times 8}{9} = 0{,}37 \text{ ohm.}$$

4. — Essai à vide : la commutatrice est alimentée par des courants triphasés.

Cet essai fournit la caractéristique à vide et les pertes magnétiques et mécaniques à vide.

Nous mesurons, pour différentes tensions d'alimentation ;
du côté alternatif :

U_a, la tension entre les bagues,
I_a, le courant absorbé :
P, la puissance absorbée;

du côté continu :

U_c, la tension entre les bornes,
i, le courant d'excitation quand $\cos \varphi = 1$.

Le montage des appareils est indiqué par la figure 1.

La tension appliquée aux bagues est d'abord maximum, soit 90 volts; nous la faisons décroître par échelons d'environ 5 volts en exécutant une série de mesures à chaque échelon.

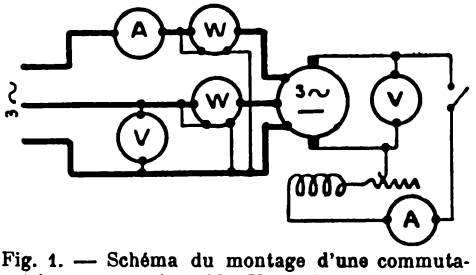


Fig. 1. — Schéma du montage d'une commutatrice pour essai à vide. Un seul wattmètre avec un commutateur approprié suffit en pratique. Le circuit inducteur est coupé pendant le démarrage.

Un réglage particulier est nécessaire pour le courant d'excitation. En effet, la commutatrice fonctionne comme un moteur synchrone; l'intensité d'excitation peut varier sans changer la tension continue, mais elle agit sur le facteur de puissance de la machine, et l'excitation qui produit un facteur de puissance égal à 1 amène au minimum le courant I_a absorbé par la commutatrice. Quand $\cos \varphi = 1$, les deux wattmètres employés pour mesurer la puissance par la méthode du double wattmètre donnent des indications égales [1]. Nous réglons donc l'excitation, *avant chaque série de mesures*, en manœuvrant le rhéostat d'excitation jusqu'à obtention des mêmes lectures aux deux wattmètres.

Un opérateur surveille l'alternateur surtout pour que la vitesse en soit constante. Un autre observe le wattmètre et règle l'excitation. Un troisième note les lectures effectuées dans un tableau du modèle qui suit :

1. Voir la 41e Manipulation, paragraphe 4.

COMMUTATRICE ALIMENTÉE EN TRIPHASÉ — ESSAI A VIDE

U_a	I_a	WATTMÈTRES P_1	WATTMÈTRES P_2	i	U_e
90 V	3,73 A	288 W	295 W	0,82 A	139 V
85	3,6	260	260	0,70	132
80	3,4	230	240	0,60	124
75	3,28	215	210	0,50	117
70	3,34	200	205	0,44	108
65,5	3,36	185	195	0,39	103
60,5	3,40	180	180	0,34	94
55	3,56	170	170	0,28	85
50	3,76	160	165	0,26	77
45	4,1	155	165	0,23	67,5
40	4,6	155	165	0,21	62

De ces lectures nous tirons les résultats que voici :

1° le ***rapport*** U_a : U_c est presque constant et égal à 0,64. Sa valeur théorique pour une commutatrice triphasée est 0,61 dans le cas où la distribution du flux dans l'entrefer est sinusoïdale. Quand la répartition est différente, le rapport est un peu plus grand;

2° la ***courbe d'aimantation*** de la machine ou caractéristique à vide : c'est la courbe de U_c en fonction de i. Elle est représentée par la figure 2. Nous aurions pu aussi l'obtenir en traitant la commutatrice comme une dynamo à excitation indépendante;

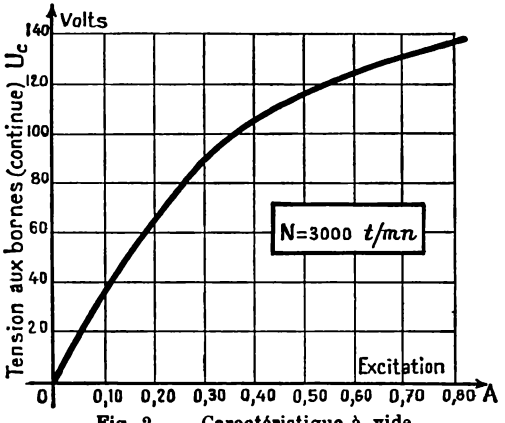


Fig. 2. — Caractéristique à vide de la commutatrice.

3° ***les pertes magnétiques et mécaniques.*** — La puissance absorbée à vide, P, est la somme des pertes :

p_j par effet Joule dans l'induit,

p_e puissance employée à l'excitation dont la valeur est $U_e \times i$, pertes dans le rhéostat comprises,

p_f pertes magnétiques dans le fer par hystérésis et courants de Foucault.

p_m, pertes mécaniques.

Donc $$P = p_f + p_e + p_f + p_m.$$

Les pertes par effet Joule sont $\frac{3}{2} r' I_a^2$ puisque la machine ne débite du côté continu que le faible courant d'excitation i et qu'on peut admettre que le courant alternatif I_a circule seul dans l'induit. L'essai a fourni tous les éléments nécessaires au calcul de p_f et de p_e pour chacune des tensions appliquées successivement aux bagues.

Nous pouvons donc déterminer

$$p_f + p_m = P - (p_f + p_e)$$

Les calculs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

COMMUTATRICE ALIMENTÉE EN TRIPHASÉ. — PERTES

U_a	P	$p_f = \frac{3}{2} r' I_a^2$	$p_e = U_e \times i$	$p_f + p_m$
90 V	583 W	7,7 W	114 W	461 W
85	520	7,2	92	421
80	470	6,4	74	390
75	425	6	58	362
70	405	6,2	48	351
65,5	380	6,3	40	334
60,5	360	6,4	32	322
55	340	7	23,8	309
50	325	7,35	20	298
45	320	9,35	15,5	295
40	320	12	13	295

La figure 3 est la courbe des pertes magnétiques et mécaniques en fonction de la tension aux bagues. En l'extrapolant jusqu'à tension nulle, nous obtenons approximativement les pertes mécaniques à peu près constantes à toute charge, soit en l'espèce $p_m = 275$ watts.

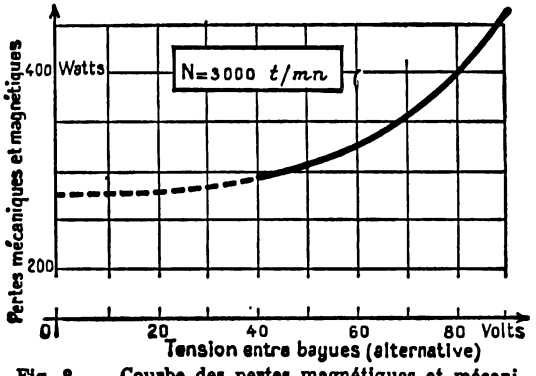


Fig. 3. — Courbe des pertes magnétiques et mécaniques en fonction de la tension entre bagues d'une commutatrice.

5. — Essai en charge : la machine débite du courant continu.

La commutatrice est alimentée à la tension constante U_a entre bagues. Nous lui faisons

débiter un courant continu I_c dans un rhéostat de charge. Pour plusieurs valeurs de I_c, nous mesurons la puissance fournie à la machine P_a et la tension continue obtenue U_c.

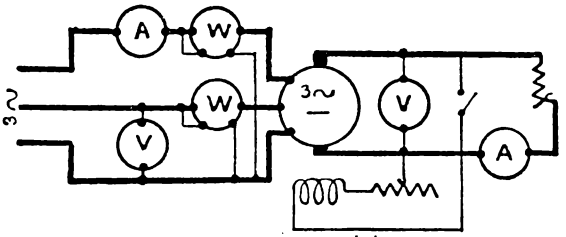


Fig. 4. — Montage d'une commutatrice pour essai en charge. On n'emploie qu'un seul wattmètre avec un commutateur approprié.

Dans le montage qui a servi pour l'essai à vide, nous supprimons l'ampèremètre placé dans le circuit d'excitation, nous ajoutons un rhéostat capable d'absorber de 5 à 30 ampères sous 120 volts avec un ampèremètre en série (fig. 4).

Comme pour l'essai à vide, avant chaque série de mesures, nous amenons à l'unité le cos φ de la commutatrice en réglant l'excitation pour que les indications du wattmètre soient les mêmes dans ses deux positions.

Les lectures faites ont été :

COMMUTATRICE ALIMENTÉE EN TRIPHASÉ. — ESSAIS EN CHARGE

		WATTMÈTRE			
U_a	I_a	P_1	P_2	U_c	I_c
80 V	32 A	2 150 W	2 275 W	123 V	30,5 A
80,5	26,5	1 750	1 875	125	24
80	21,3	1 475	1 500	127	18,7
80	17,3	1 150	1 250	127,2	14,4
80	7,95	550	550	128	4,8
81	3,7	400	115	129	0,0

De ces mesures, nous tirons les résultats suivants :

1° *la tension continue* décroît quand le courant débité augmente, elle est 129 volts à vide et 125 volts à pleine charge (3 000 W), la baisse est donc de 3,2 pour cent. La figure 5 est la courbe de cette tension en fonction de l'intensité débitée.

La chute de tension est plus faible que celle qui se produit dans une génératrice en dérivation. On ne peut la corriger en augmentant l'exci-

tation ; il faut ou accroître la tension alternative d'alimentation ou ajouter un survolteur du côté continu, ou encore compounder la commutatrice ;

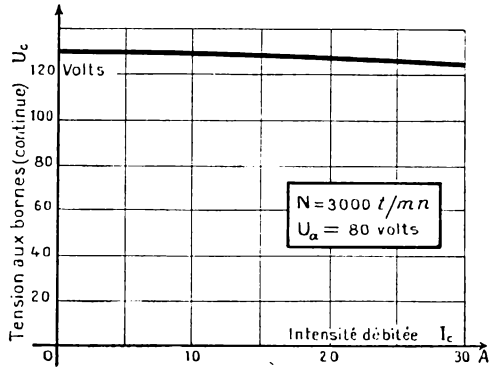


Fig. 5. — Courbe de la tension aux bornes d'une commutatrice en fonction de l'intensité débit e.

2° les valeurs de U_c et de I_c permettent de calculer la puissance débitée par la commutatrice et, puisque nous avons mesuré la puissance absorbée P_a, de déterminer ***le rendement***

$$\eta = \frac{U_c I_c}{P_a}$$

Dans le cas de la commutatrice essayée, les calculs se résument ainsi :

COMMUTATRICE ALIMENTÉE EN TRIPHASÉ. — RENDEMENT

P_a	U_c	I_c	$U_c I_c$	η
4 425 W	123 V	30,5 A	3 750 W	0,847
3 625	125	24,0	3 000	0,827
2 975	127	18,7	2 375	0,798
2 400	127,2	14,4	1 830	0,762
1 100	128	4,8	612	0,557
515	129	0,0		

La figure 6 est la courbe du rendement en fonction de la puissance utile.

6. — Le rendement peut aussi se calculer par la méthode des pertes séparées.

Par exemple, quand la commutatrice essayée débite sa puissance nominale, soit 3 000 watts ou 25 ampères sous 120 volts, les différentes pertes déterminées par l'essai à vide sont :

les pertes magnétiques et mécaniques..... 390 watts,
la puissance employée à l'excitation ..... 75 watts.

D'autre part, les pertes par effet Joule dans l'induit peuvent être calculées. Le courant continu débité, 25 ampères, se partage entre les

deux moitiés de l'enroulement de l'induit et s'ajoute algébriquement aux courants alternatifs qui alimentent la commutatrice. On établit que le rapport des pertes Joule dans le fonctionnement en commutatrice aux pertes Joule dans le fonctionnement en machine à courant continu est, pour $\cos \varphi = 1$

en *monophasé* 1,38
en *triphasé* 0,567
en *hexaphasé* 0,207.

Les pertes par effet Joule dans l'induit de la machine essayée sont donc

$$0{,}44 \times \overline{25}^2 \times 0{,}567 = 156 \text{ watts.}$$

Le total des pertes est ainsi :

$$390 + 75 + 156 \cong 620 \text{ watts,}$$

et le rendement

$$\eta = \frac{3000}{3000 + 620} = 0{,}828$$

est sensiblement égal à celui que nous avons obtenu par mesure directe.

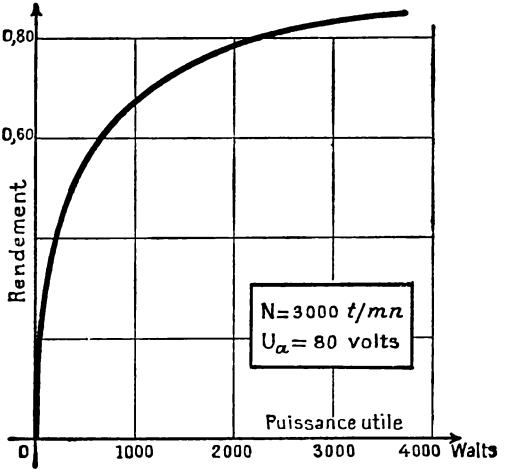


Fig. 6. — Rendement d'une commutatrice en fonction de la puissance utile.

Cette méthode permet d'éviter l'essai en charge qui est onéreux et exige un matériel important quand les machines sont puissantes.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Quelques conseils aux élèves sur les manipulations..... 5

INTRODUCTION

Notions sur les erreurs de mesures et les approximations numériques :
Erreurs de mesures..... 8
Approximations numériques..... 12
Moyennes de mesures et courbes figuratives..... 16

Ire Partie. — MESURES DE LABORATOIRE

1re Manipulation. — Comparaison d'un ampèremètre ou d'un voltmètre à des appareils étalons..... 19
2e Manipulation. — Mesure industrielle d'une résistance moyenne avec un ampèremètre et un voltmètre..... 24
3e Manipulation. — Mesure d'une faible résistance par comparaison à un shunt d'ampèremètre..... 29
4e Manipulation. — Mesure d'une grande résistance avec un voltmètre... 32
5e Manipulation. — Mesure de la force électromotrice et de la résistance intérieure d'une pile ou d'un accumulateur..... 35
Note sur les étalons de f. é. m..... 39
6e Manipulation. — Consommation d'une lampe à incandescence. Éclairement en fonction de la tension..... 41
7e Manipulation. — Mise en station et réglage d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval..... 45
8e Manipulation. — Amortissement et résistance critique d'un galvanomètre à cadre mobile..... 51
9e Manipulation. — Transformation d'un galvanomètre en voltmètre ou en ampèremètre..... 55
10e Manipulation. — Pyromètres thermo-électriques..... 59
11e Manipulation. — Mesure d'une résistance avec une boîte à pont..... 64
12e Manipulation. — Emploi d'un pont à fil..... 69
13e Manipulation. — Mesure de très faibles résistances avec un double pont..... 73
14e Manipulation. — Mesure de la résistance d'isolement d'un appareil ou d'une installation..... 76
Note. — Montage d'un milliampèremètre en ohmmètre à lecture directe. 84
15e Manipulation. — Mesure de la résistance des prises de terre..... 89
16e Manipulation. — Étalonnage d'un voltmètre ou d'un ampèremètre avec un potentiomètre..... 95
17e Manipulation. — Étalonnage d'un wattmètre monophasé..... 101
18e Manipulation. — Étalonnage d'un compteur de courant continu..... 104
19e Manipulation. — Mesure d'une self par la méthode de Joubert..... 113
20e Manipulation. — Résonance. Circuit bouchon..... 118

Pages.

21e Manipulation. — Mesure des capacités. Capacimètre 125
22e Manipulation. — Mesure des capacités par la méthode des oscillations de relaxation 129
23e Manipulation. — Mesure au wattmètre de la puissance d'un récepteur monophasé 133
24e Manipulation. — Mesure au wattmètre de la puissance d'un récepteur triphasé 139
25e Manipulation. — Étalonnage d'un compteur monophasé 146
26e Manipulation. — Étude d'un tube triode 153
Note sur le perméamètre Iliovici et l'appareil d'Epstein 160

2e Partie. — ESSAIS DE MACHINES

Quelques observations générales sur les essais de machines 168

27e Manipulation. — Dynamo à excitation indépendante. Résistances et caractéristique à vide 172
28e Manipulation. — Dynamo à excitation indépendante. Caractéristique en charge. Courbe de réaction d'induit 179
29e Manipulation. — Dynamo excitée en dérivation. Caractéristique en charge. Courbe de réglage 183
30e Manipulation. — Rendement d'une dynamo excitée en dérivation 192
31e Manipulation. — Dynamo excitée en série. Caractéristique en charge. Rendement 196
32e Manipulation. — Dynamo à excitation composée 202
33e Manipulation. — Moteur excité en dérivation. Caractéristique de vitesse. Rendement 206
34e Manipulation. — Moteur excité en dérivation. Caractéristique de couple. Couple de démarrage 213
35e Manipulation. — Moteur excité en série. Caractéristique de vitesse. Rendement 219
36e Manipulation. — Moteur excité en série. Caractéristique de couple. Couple de démarrage 222
37e Manipulation. — Moteur à excitation composée. Caractéristiques et rendement 225
38e Manipulation. — Transformateur monophasé. Résistances. Essais à vide. Essai direct en charge 232
39e Manipulation. — Transformateur monophasé. Essai en court-circuit. Diagramme de Kapp. Rendement 238
Note. — Calcul approximatif d'une bobine de self réglable, à noyau droit. 246
40e Manipulation. — Alternateur triphasé 250
41e Manipulation. — Moteur synchrone triphasé. Courbes en V 257
42e Manipulation. — Motor asynchrone triphasé à rotor en court-circuit. Essais à vide et en charge. Rendement. Couple 264
43e Manipulation. — Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit. Essai au frein de Prony. Couple. Puissance utile. Rendement 272
44e Manipulation. — Moteur asynchrone triphasé à bagues 277
45e Manipulation. — Commutatrice triphasée 284

Imprimé en France par BRODARD-TAUPIN, Imprimeur-Relieur, Coulommiers-Paris.
5602/2-5-1968. Dépôt légal : 2e trimestre 1968. N° d'Editeur : 3538.

TECHNOLOGIE DES FABRICATIONS MÉCANIQUES

Collection publiée sous la Direction de **A. CHEVALIER**
Professeur technique de mécanique à l'E. N. N. A. de Paris

20 Fascicules (22,5 x 28), de 64 à 80 pages
Planches en regard du texte

---

1. Le Livret de l'apprenti débutant
Par A. CHEVALIER et E. LECŒUR.

2. Traçage et travaux de l'ajusteur mécanicien
Par E. LECŒUR.

3. Tournage des métaux
Par A. CHEVALIER et R. JOLYS.

4. Fraisage des métaux
Par A. DOURNIER et R. SAGET.

5. Rabotage et brochage
Par M. VIGNAUD et R. DIETRICH.

6. Perçage, alésage, filetage
Par A. CHEVALIER et L. LABURTE.

7. Usinage par abrasion
Par A. CHEVALIER et R. LABILLE.

8. Assemblage et montage
Par E. LECŒUR.

9. Matériaux. Traitements
Par J. LIGNON et M. MIJON.

10. Usinage sans copeaux
Par J. HIBOUT et M. ROGER.

11. Étude de la coupe des métaux
Par A. CHEVALIER.

12. Étude fonctionnelle des machines-outils
Par A. JOLYS, R. PASQUET et R. VACQUER.

13. Métrologie dimensionnelle
Par A. CHEVALIER et L. LABURTE.

14. Automatisation des machines-outils
Par M. BERNARD.

15. Organisation des ateliers
Par A. HEURLEY et J. ROLLET.

16. Analyse des travaux
Par A. CHEVALIER et E. LECŒUR.

17. Étude des temps d'exécution
Par A. CHEVALIER et le B. T. E.

18. Bureau d'Études
Par M. DELANETTE.

19. Montages d'usinage
Par A. CHEVALIER et R. VACQUER.

20. Méthode de dessin industriel
Par A. CHEVALIER et H. RIBEROL.

Imprimé en France • DELAGRAVE-PARIS (10-67)